



Technische Universität München
Ingenieurfakultät Bau Geo Umwelt
Professur für Signalverarbeitung in der Erdbeobachtung
Prof. Dr.-Ing. habil. Xiaoxiang Zhu

Automatisierte Interpretation von optischen Satellitenaufnahmen urbaner Gebiete anhand von Simulationsverfahren

Automated interpretation of optical satellite imagery of urban areas based on simulation methods

Isabel Hornig

Master's Thesis

Bearbeitung: 01.04.2016 - 30.09.2016
Studiengang: Geodäsie und Geoinformation (Master)
Betreuer: Dr.-Ing. Stefan Auer (DLR, IMF-PBA)
Dr. rer. nat. Christian Geiß (DLR, DFD)
Dr.-Ing. Michael Schmitt (TUM, SiPEO)

Kooperation:



Institut für Methodik der Fernerkundung -
Photogrammetrie und Bildanalyse (IMF-PBA)
Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum (DFD)

Selbstständigkeitserklärung

Erklärung gemäß §18 Absatz 9 APSO der Technischen Universität München:

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Master's Thesis selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe angefertigt habe. Die verwendeten Literaturquellen sind im Literaturverzeichnis vollständig aufgeführt.

Isabel Hornig

München, den 30.09.2016

Aufgabenstellung

Radio Detection And Ranging (Radar) Satelliten arbeiten im **Synthetic Aperture Radar** (SAR)-Modus. Durch das SAR Aufnahmeverfahren weisen Radarsensoren besondere Abbildungseffekte von Objekten in Radarbildern auf. Dabei kommt es zu einem vertikalen Lagerversatz von Gebäuden oder anderen erhabenen Objekten im Satellitenbild. Diese Tatsache erschwert eine automatisierte visuelle Interpretation der abgebildeten Szene in Radarbildern. Aus diesem Grund wurde bereits ein Simulator namens **Geocoding extended Ray Tracing based SAR Image simulator** (GeoRaySAR) entwickelt, der eine automatische Interpretation möglich macht. Ähnlich wie in Radarbildern tritt auch in hochauflösenden optischen Satellitenbildern je nach Einfallswinkel des aufnehmenden Systems ein Lageversatz von vertikal ausgedehnten Objekten auf. Die Überlagerung des Objekts in der abgebildeten Szene erfolgt in Abhängigkeit von der Aufnahmegeometrie des Sensors in einem unterschiedlichen Ausmaß. Dadurch ist auch die automatische Interpretation von optischen Daten mit Schwierigkeiten verbunden. In dieser Masterarbeit soll eine Verallgemeinerung stattfinden, indem der bereits existierende Simulator GeoRaySAR um den **Geocoding extended Ray Tracing based Optical Image simulator** (GeoRayOpt) erweitert wird, mit dem sich optische Bilddaten vollautomatisiert analysieren lassen. Dadurch soll ein gemeinsamer methodischer Rahmen entstehen, der die Simulation sowohl auf Basis von **Light Detection And Ranging** (LiDAR) Daten als auch basierend auf optischen Daten durchführen kann. Die jeweilige Simulationsart soll lediglich anhand der Dateneingabe entschieden werden. Die ausgeschriebene Masterarbeit beschäftigt sich mit drei grundlegenden Aspekten.

Zunächst soll die Funktionalität des Simulators GeoRaySAR nachvollzogen, verstanden und getestet werden. In diesem Zusammenhang ist es notwendig, den bestehenden Quellcode durch Hinzufügen von Kommentaren zum besseren Verständnis, durch Entfernung von unnötigen Berechnungen und durch die eindeutigere Benennung von Variablen und Parametern zu überarbeiten.

In einem zweiten Schritt besteht die Aufgabe darin, verschiedene GeoRayOpt Module zu realisieren, um eine kohärente Simulationsumgebung zu erstellen, die flexibel für Radar und Optik ist. Dabei sollen die Parameter von Sensormetadaten und Sonnenstand analysiert und eingebunden werden, um die Simulation von optischen Szenen einleiten zu können (Ergänzungen bezüglich des **Persistence Of Vision Ray Tracer** (POV-Ray)). Die simulierten optischen Daten müssen in die bestehende Prozesskette von GeoRaySAR integriert werden, wobei eine Anpassung der Bildgenerierung, Geokodierung und Layererstellung vorgenommen werden muss. Die Ableitung von möglichen Zusatzinformationen, wie zum Beispiel dem **Normalized Differenced Vegetation Index** (NDVI), aus den optischen Daten muss geprüft und gegebenenfalls integriert werden, um das Simulationser-

gebnis anzureichern.

Als Letztes sollen konkrete Fallbeispiele simuliert werden, um die Übertragbarkeit bzw. die Verwendbarkeit der Methodik bewerten zu können. Dafür ist ein Bezug zu konkreten Anwendungen herzustellen. Außerdem ist eine Ausarbeitung für die Sicherung und Dokumentation der Ergebnisse zu erstellen.

Das mit der Masterarbeit verbundene Arbeitspaket umfasst eine umfangreiche Einarbeitung in das Programm des bestehenden Simulators GeoRaySAR für die Ermittlung der notwendigen Grundlagen und eine Programmierarbeit in Python auf Basis der Plattform Ubuntu Linux für die Ausführung der Machbarkeitsstudie.

Dr.-Ing. Stefan Auer (DLR, IMF-PBA)
Dr. rer. nat. Christian Geiß (DLR, DFD)
Dr.-Ing. Michael Schmitt (TUM, SiPEO)

München, den 01.04.2016

Kurzfassung

In dieser Masterarbeit wird der Simulator GeoRayOpt ausgearbeitet, der eine visuelle Interpretation optischer Satellitenbilddaten urbaner Gebiete ermöglicht. Der entwickelte Simulator basiert auf dem bereits existierenden Simulator GeoRaySAR und erlaubt die Simulation und Geokodierung optischer Bilder ausgehend von vorhandenen dreidimensionalen Geodaten und den Metadaten einer optischen Satellitenaufnahme. Die Zuweisung raumbezogener Informationen schafft die Voraussetzung für einen direkten Vergleich mit dem originalen optischen Satellitenbild. Aufbauend auf die beiden Simulatoren GeoRaySAR und GeoRayOpt wird eine vollautomatische Simulationsumgebung entwickelt, die es ermöglicht, je nach Eingangsdaten, eine Szeneninterpretation von Satellitenaufnahmen unterschiedlichen Sensortyps vorzunehmen. Neben dem hochauflösenden optischen Satellitenbild einer bestimmten Szene, das die Informationen bezüglich der Aufnahmegeometrie während der Bilderfassung liefert, dient ein **Digitales Oberflächenmodell** (DOM) derselben Szene als Datengrundlage für die Simulationsumgebung. Durch die Zerlegung des DOMs in ein **normalisiertes Digitales Oberflächenmodell** (nDOM) und ein **Digitales Geländemodell** (DGM) stehen drei verschiedene digitale Modelle zur Verfügung, welche die Geometrie der zu simulierenden Szene in unterschiedlicher Art und Weise beschreiben. Die auf Basis dieser drei Modelle resultierenden Simulationsergebnisse werden im Anschluss miteinander kombiniert, um unterschiedliche Binärbildmasken zur Analyse des Bildinhalts der jeweiligen urbanen Szene zu erstellen. Diese Informationen können vor allem für Veränderungsanalysen dicht besiedelter Städte von Nutzen sein. Die semantische Klassifikation verschiedener Bildbereiche kann die zur Durchführung der Analysen verwendete Datengrundlage verfeinern. Der Simulator trägt daher zur Verbesserung der Bewertung von Veränderungen städtischer Regionen bei.

Der Umfang dieser Masterarbeit reicht von der Beschreibung der relevanten Grundlagen und der Darstellung der entwickelten Methodik des GeoRayOpt Simulators über dessen Anwendung auf konkrete Beispielszenarien und der Generierung verschiedener Binärbildmasken zur Bildinterpretation bis hin zur Erarbeitung von Anwendungsmöglichkeiten.

Abstract

In this Master's Thesis, the simulator GeoRayOpt is investigated, allowing for a visual interpretation of optical satellite image data for urban areas. The developed simulator is predicated on the already existing simulator GeoRaySAR and allows for simulation and geocoding of optical images ensuing from available three-dimensional geodata and the meta data of an optical satellite image. The assignment of geospatial information creates the prerequisite for a direct comparison with the original optical satellite image. Based on both simulators GeoRaySAR and GeoRayOpt a fully automated simulation environment is developed, which submits to carry out a scene interpretation of satellite images from different sensor types depending on the input data. In addition to the high-resolution optical satellite image of a particular scene, supplied by information relating to the imaging geometry during image acquisition, a **Digital Surface Model** (DSM) of the same scene serves as the base data for the simulation environment. By breaking down the DSM into a **normalized Digital Surface Model** (nDSM) and a **Digital Terrain Model** (DTM), three different digital models are created, which describe the geometry of the simulated scene in different ways. The simulation results based on these three models are then combined with each other to create various binary image masks used in the analysis of the image content of each urban scene. These informations can be especially beneficial for change detection of densely populated urban areas. The semantic classification of different image areas can refine the base data used to perform these analyzations. The simulator, therefore, is able to contribute to improving the assessment of changes in the urban areas.

The scope of this Master's Thesis ranges from the description of the relevant fundamentals and the presentation of the simulator's developed methodology to its application on specific example scenarios and the generation of various binary image masks for image interpretation along with the preparation of applications.

Abkürzungsverzeichnis

CCD	Charged Coupled Device	52
CE90	Circular Error 90	56
CityGML	City Geography Markup Language	115
CNES	Centre National d'Études Spatiales	53
DFD	Deutsche Fernerkundungsdatenzentrum	62
DGM	Digitales Geländemodell	vii
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.	10
DOM	Digitales Oberflächenmodell	vii
nDOM	normalisiertes Digitales Oberflächenmodell	vii
DSAs	Detector Sub-Arrays	55
DSM	Digital Surface Model	ix
nDSM	normalized Digital Surface Model	ix
DTM	Digital Terrain Model	ix
EOC	Earth Observation Center	10
GDAL	Geospatial Data Abstraction Library	64
GeoRayImg	Geocoding extended Ray Tracing based Image simulator	5
GeoRayOpt	Geocoding extended Ray Tracing based Optical Image simulator	v
GeoRaySAR	Geocoding extended Ray Tracing based SAR Image simulator	v
IMF	Institut für Methodik der Fernerkundung	10
LiDAR	Light Detection And Ranging	v
LoS	Line of Sight	xiv
NDVI	Normalized Differenced Vegetation Index	v
PBA	Photogrammetrie und Bildanalyse	58
PHR1A	Pléiades High Resolution-1A	53
PHR1B	Pléiades High Resolution-1B	6
POV	Persistence Of Vision	xiii

POV-Ray	P ersistence O f V ision R ay T racer	v
QB2	Q uick B ird- 2	6
Radar	R adio D etection A nd R anging	v
RaySAR	R ay T racing based SAR simulator	2
RGB	R ot, G rün und B lau	31
RPCs	R ational P olynomial C oefficients	6
SAR	S ynthetic A perture R adar	v
SGM	S emi- G lobal M atching	58
TSX	T erra SAR-X	2
TUM	T echnische U niversität M ünchen	7
UTM	U niversal T ransverse M ercator	xiii
WV2	W orld V iew- 2	6
XDibias	E xtended D igital I nteractive B avarian I mage A nalysis S ystem	10

Symbolverzeichnis

Variablen

B	Breite
BM	Binärbildmaske
Cut	Zuschnitt des simulierten Bildes
D	Horizontaler Abstand zwischen dem Zentrum der Modellbox und der benutzerdefinierten Position des Sensors bzw. der Lichtquelle im Persistence Of Vision (POV) Koordinatensystem (= lokales Koordinatensystem)
E	Ecke der Modellbox
H	Höhe
L	Länge
M	Ausmaß der Überlagerung/geometrischen Verzerrung der Modellbox
N	Anzahl
PS	Pixelauflösung
V	Versatz/Verschiebung
X	Ostkoordinate bzw. in Ostrichtung im Universal Transverse Mercator (UTM) Koordinatensystem (= globales Koordinatensystem)
Y	Nordkoordinate bzw. in Nordrichtung im UTM Koordinatensystem
Z	Höhenkoordinate bzw. in Höhenrichtung im UTM Koordinatensystem
x	Rechtskoordinate bzw. in Rechtsrichtung im POV Koordinatensystem
y	Hochkoordinate bzw. in Hochrichtung im POV Koordinatensystem
z	Tiefenkoordinate bzw. in Tiefenrichtung im POV Koordinatensystem
\vec{X}	Vektor mit einer x-, y- und z-Koordinate
\vec{Z}	Höhenachse im UTM Koordinatensystem
α	Azimutwinkel
α_2	Angepasster Azimutwinkel

β	.....	Blickwinkel
δ	.....	Gegen den Uhrzeigersinn verlaufender Winkel zwischen der UTM X -Achse und der Line of Sight (LoS) des Sensors
ε	.....	Elevationswinkel
ρ	.....	Rotationswinkel
θ	.....	Einfallswinkel

Indices

<i>Bo</i>	Boden
<i>Box</i>	Box des Modells/Modellbox
<i>Geb</i>	Gebäude
<i>Geo</i>	Geokodiertes Bild
<i>H</i>	Höhe
<i>HBa</i>	Hochwert-Bildachse
<i>KW</i>	Kein Wert
<i>Lay</i>	Layover
<i>LoS</i>	LoS/Blickrichtung des Sensors
<i>Mo</i>	Modell
<i>Opt</i>	Hochauflösendes optisches Satellitenbild
<i>POV</i>	Benutzerdefinierte Position im POV Koordinatensystem
<i>RBa</i>	Rechtswert-Bildachse
<i>S</i>	Spalten
<i>SAR</i>	SAR Bild
<i>Sch</i>	Schatten
<i>Se</i>	Sensor
<i>Sehstrahl</i>	Sehstrahl des Sensors während der Bilderfassung
<i>Simu</i>	Simuliertes Bild in POV-Ray
<i>So</i>	Sonne
<i>Tr</i>	Translation
<i>Veg</i>	Vegetation
<i>Z</i>	Zeilen
<i>Ze</i>	Zentrum der Modellbox
<i>diff</i>	Differenz
<i>gr</i>	Großes Modell
<i>hor</i>	Horizontal
<i>kl</i>	Kleines Modell
<i>lo</i>	Mitte des linken oberen Pixels
<i>lu</i>	Mitte des linken unteren Pixels
<i>max</i>	Maximum

<i>min</i>	Minimum
<i>mit</i>	Mitte
<i>ori</i>	Originale Daten
<i>ref</i>	Referenz-/Bezugs-
<i>rot</i>	Rotiertes Bild
<i>vor</i>	Vorprozessierte Daten
<i>vrt</i>	Vertikal
<i>wahr</i>	Wahre Position während der Aufnahme des Objekts
1,...,4	Indices zur Differenzierung

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Fachliches Umfeld	1
1.2	Motivation	3
1.3	Ziele der Arbeit	5
1.4	Aufbau der Arbeit	5
2	Grundlagen	7
2.1	Bestehender Simulator GeoRaySAR	7
2.2	Verwendete Programme	9
2.2.1	Programmiersprache Python und deren Entwicklungsumgebung PyCharm	9
2.2.2	Digitales Bildverarbeitungssystem XDibias	10
2.2.3	Ray Tracing Software POV-Ray	11
2.3	Rational Polynomial Coefficients (RPCs)	12
3	Methodik	15
3.1	Ablauf der vollautomatischen Simulationsumgebung	15
3.2	Simulator GeoRayOpt	17
3.2.1	Generierung einer .pov Datei aus dem 2,5D Bild des Modells und Berechnung der Modellparameter	18
3.2.2	Bestimmung notwendiger Metadaten des hochauflösenden optischen Satellitenbildes	21
3.2.3	Ergänzung der .pov Datei um Sensor-, Licht- und Modellparameter	25
3.2.4	Durchführung des Ray Tracings in POV-Ray	36
3.2.5	Geokodierung des simulierten Bildes	37
3.3	Kombinationen der Simulationsparameter in GeoRayImg	48

4	Optische Sensoren und Datengrundlage	51
4.1	Optische Sensoren	51
4.1.1	QuickBird-2 Satellit	51
4.1.2	Pléiades-1B Satellit	53
4.1.3	WorldView-2 Satellit	54
4.1.4	Lokalisationsgenauigkeit der optischen Sensoren	56
4.2	Datengrundlage	58
4.2.1	Testgebiet München	58
4.2.2	Testgebiet Dongying	62
4.2.3	Vorprozessierung der Daten	66
5	Szenariobasierte Fallstudien	71
5.1	Simulationen am Beispiel des Testgebiets München	71
5.2	Layergenerierung am Beispiel des Testgebiets München	77
5.2.1	Binärbildmaske 'Gebäudelayover': $BM_{Lay,Geb}$	77
5.2.2	Binärbildmaske 'Boden': BM_{Bo}	79
5.2.3	Binärbildmaske 'Schatten': BM_{Sch}	81
5.2.4	Binärbildmaske 'Kein Wert': BM_{KW}	86
5.2.5	Binärbildmaske 'Vegetation': BM_{Veg}	87
5.2.6	Kombinierte Darstellung der Binärbildmasken	90
5.3	Simulationen am Beispiel des Testgebiets Dongying	91
5.4	Diskussion	94
5.4.1	Lagegenauigkeit der Simulationsergebnisse	94
5.4.2	Qualität des DOMs	96
5.4.3	Einfluss der Vegetation	96
6	Anwendungsmöglichkeiten der Simulationsergebnisse	99
6.1	Verbesserung von Veränderungsanalysen am Beispiel des Testgebiets Dongying	99
6.2	Objektbasierte Klassifikation optischer Satellitenbilder	105
6.3	Kombination von Optik und Radar	106
7	Zusammenfassung	111

8 Ausblick	113
8.1 Zukünftige Verwendung der Simulationsergebnisse	113
8.2 Verbesserung der Simulationsergebnisse	113
8.3 Nachbearbeitung des nDOMs	114
8.4 Erweiterung des Potentials von GeoRayImg	115
8.5 Objektbezogene Analyse von Einzelgebäuden	115
Literaturverzeichnis	119
Abbildungsverzeichnis	125
Tabellenverzeichnis	129
Anhang	131
A Vorprozessierung nach [Ilehag 2016]	131
B Verfügbarkeit von Daten und Quellcode	132

Kapitel 1

Einleitung

Zur Einführung in das fachliche Umfeld dieser Arbeit werden verwandte und zugrundeliegende Arbeiten vorgestellt. Neben der erläuterten Motivation, sich mit dem Thema „Automatisierte Interpretation von optischen Satellitenaufnahmen urbaner Gebiete anhand von Simulationsverfahren“ zu beschäftigen, folgt die Darstellung der Ziele, die im Zuge der Masterarbeit erreicht werden sollen, und die Beschreibung des Aufbaus der Arbeit.

1.1 Fachliches Umfeld

Aufgrund der Möglichkeit, unabhängig von der Tageszeit, Jahreszeit und des Wetters Satellitenbilder zu erfassen, stellt SAR eine wichtige Rolle in der Erdbeobachtung- und abbildung dar. Neben den Vorteilen von SAR Aufnahmeverfahren ergeben sich aufgrund der speziellen Abbildungsgeometrie jedoch auch große Herausforderungen in der visuellen Analyse von Radarbildern. Die in SAR Bildern auftretenden Effekte, wie Layover, Radarschatten und Mehrfachreflexionen (Zweifach-/Doppelreflexionen und gegebenenfalls auch Dreifachreflexionen) erschweren die Interpretation vor allem in dicht besiedelten urbanen Gebieten. Grund dafür sind die Abbildungseigenschaften nahe aneinander gebauter Häuser, die unterschiedlich hoch sind und deren Fassaden aus verschiedenen Materialien bestehen. Verschiedene Materialien, die nicht gleichartige Oberflächeneigenschaften aufweisen, reflektieren die Radarstrahlen in unterschiedlicher Art und Weise und die Höhe der Gebäude hat Auswirkung auf den Layover- und Radarschatteneffekt. Die dichte Bauweise von Gebäuden verdeckt andere nebenstehende Bauwerke im Radarbild, wodurch eine eindeutige Identifikation der gesamten Gebäudeausdehnung in den meisten Fällen nicht möglich ist. Außerdem erzeugen Mehrfachreflexionen im SAR Bild hell erscheinende Linien und Punktsignaturen und verursachen dadurch hohe lokale Intensitätskontraste [Tao u. a. 2011].

Ein Beispiel für eine erschwerte Analyse von SAR Bildern stellen die beiden Graphiken in Abb. 1.1 dar. Die Frauenkirche im Zentrum Münchens, die in Abb. 1.1(a) gezeigt ist, kann bei Abbildung in einem Radarbild (vgl. Abb. 1.1(b)) aufgrund der vorher genannten auftretenden Abbildungseffekte nicht sofort identifiziert werden. Es ist nicht möglich, die gesamte Geometrie des Gebäudes und seine exakten Gebäudegrenzen zu erfassen. Beispielsweise sind die Zwillingstürme der Frauenkir-

che nicht auf Anhieb sichtbar [Tao u. a. 2014].

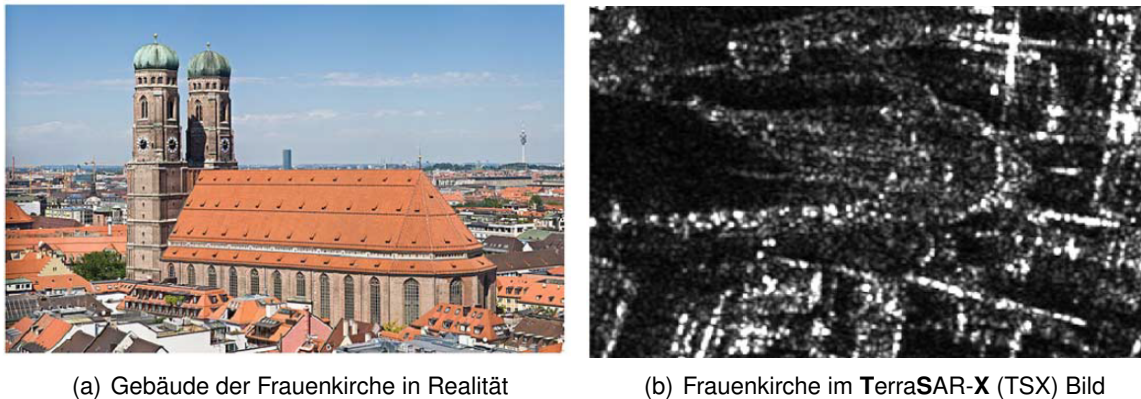


Abbildung 1.1 – Frauenkirche im Zentrum Münchens [Tao u. a. 2014]

Zur Vereinfachung der visuellen Interpretation von Radarbildern städtischer Gebiete existieren bereits verschiedene Simulatoren. [Brunner u. a. 2011] stellt einen Simulator vor, der darauf abzielt, die Geometrie von Objekten in SAR Bildern mit Hilfe eines vereinfachten Strahlungsmodells präzise zu simulieren. Der Simulator basiert auf einem erweiterten Ray Tracing Modell, um die Rückstreuung verschiedener Objektoberflächen zu bestimmen. Zur Berechnung der Reflexionsbeiträge spiegelnder und diffuser Strahlung wird ein vereinfachtes radiometrisches Modell herangezogen. Dieses geht von der Winkelabhängigkeit der Strahlstärke nach Lambert und einer spiegelnden Reflexion aus. Es kann gezeigt werden, dass trotz des gewählten vereinfachten Reflexionsmodells die durch die Geometrie hervorgerufenen Effekte wie Layover, Schatten und Mehrfachreflexionen berechnet werden können.

In [Guida u. a. 2008] wird ein Simulator erarbeitet, der elektromagnetische Modelle anwendet, um hochauflösende SAR Bilder urbaner Gebiete, nicht beschränkt auf die Geometrie der Szene, detailliert zu untersuchen. Ziel ist es, Eigenschaften von Radarbildern in Bezug auf komplexe Gebäude und elektromagnetische Parameter zu extrahieren und zu beschreiben. Der Simulator dient dazu, SAR Rohdaten auszuwerten, um die Szeneninterpretation von Radarbildern zu verbessern.

In [Tao u. a. 2014] wird der Simulator GeoRaySAR vorgestellt, mit dem eine vollautomatische Simulation von hochauflösenden SAR Bildern zur Identifikation von Gebäuden in komplexen städtischen Gebieten durchgeführt werden kann. Zur Generierung der simulierten SAR Bilder wird der **Ray** Tracing based **SAR** simulator (RaySAR) verwendet, der in [Auer u. a. 2010] genauer beschrieben ist. Ein DOM liefert die Informationen bezüglich der Geometrie der urbanen Szene. Nach Erzeugung simulierter Radarbilder werden diese geokodiert, um anschließend durch die Erstellung verschiedener Bildlayer einen Vergleich mit dem originalen SAR Bild und damit eine Szeneninterpretation zu ermöglichen.

[Tao u. Auer 2016] schlägt eine vollautomatisierte Methode vor, die, aufbauend auf den aus simulierten SAR Bildern gewonnenen Informationen, auf Gebäude bezogene Veränderungsanalysen (Change Detection) durchführt. Datengrundlage sind zwei zeitlich versetzte hochauflösende SAR Bilder und ein DOM, das die Geometrie der Szene beschreibt. Dabei weisen die beiden Radarbilder unterschiedliche Einfallswinkel der Sensorstrahlen auf, wodurch es zu einem unterschiedlichen

Abbildungseffekt von Objekten in den beiden Bildern kommt. Es werden zwei Verfahren zur Analyse von Veränderungen in städtischen Regionen vorgestellt. Unter Verwendung des GeoRaySAR Simulators in [Tao u. a. 2014] und den daraus resultierenden Bildlayern beider SAR Aufnahmen werden zum einen durch Vergleich der Layover-, Schatten- und Bodenbereiche der beiden Radarbilder die Gebäudeveränderungen detektiert. Zum anderen werden einzelne Gebäudefassaden in den beiden SAR Bildern miteinander verglichen, um Veränderungen festzustellen. Die entwickelte Methode erhöht die Flexibilität und Einsetzbarkeit von SAR Bildern bei unvorhersehbaren Katastrophen, wie zum Beispiel Erdbeben oder Überflutungen.

Im Gegensatz zu SAR Sensoren stellen optische Sensorsysteme oftmals schneller Bilddaten einer bestimmten Szene zur Verfügung. Daher ist in Krisensituationen der Zugang zu Satellitenaufnahmen optischer Sensoren wahrscheinlicher als zu SAR Bildern.

[Leichtle u. a. 2016] erarbeitet eine Methode, die mit optischen Bilddaten unüberwacht und objektbasiert Veränderungen innerhalb urbaner Gebiete analysieren kann. Die Datengrundlage stellen zwei heterogene optische Bilddatensätze dar, die mit verschiedenen Sensoren erfasst sind und voneinander abweichende Aufnahmeparameter aufweisen. Die notwendigen Objektgeometrien werden aus einem nDOM extrahiert. Anhand von unterschiedlichen objektbasierten Eigenschaften wird durch Vergleich der jeweiligen Bildinhalte in den beiden optischen Aufnahmen eine Veränderungsanalyse vollautomatisiert durchgeführt. Es kann damit eine Einteilung in die zwei Klassen „verändert“ und „unverändert“ erfolgen.

Anwendung finden die auf optischen Daten basierenden Veränderungsanalysen in [Geiß u. a. 2015] beispielsweise bei der Typisierung und Feststellung der Verwundbarkeit von einzelnen Gebäuden im Falle eines Erdbebens. Dabei besteht das wesentlich Ziel darin, die Gebäude in Städten in unterschiedliche Gebäudetypen zu kategorisieren und verschiedene Gebäudestrukturen zu typisieren, um Erdbebenschäden schon im Vorfeld abschätzen zu können. Hinter jedem Gebäudetyp steht dabei eine Schadensfunktion, welche die Intensität eines Erdbebens mit einem erwarteten Schadensgrad des Gebäudetyps verknüpft. Diese Verknüpfung erlaubt, die Anzahl an zerstörten Gebäuden und den Grad der Zerstörung für ein Erdbebenszenario zu antizipieren. Aufgrund des schnellen Wachstums vieler Städte sind für die Typisierung und Feststellung der Verwundbarkeit von Gebäuden Veränderungsanalysen in regelmäßigen zeitlichen Abständen notwendig, um veraltete Daten zu vermeiden. Durch eine Veränderungsanalyse kann das Gebäudeinventar aktualisiert werden, um anschließend eine erneute Gebäudetypisierung vornehmen zu können.

1.2 Motivation

Obwohl optische Sensoren vorwiegend in Nadir-Blickrichtung aufnehmen sollten, liefern sie oftmals Aufnahmen, die aus einer von der Nadirrichtung abweichenden Aufnahmerichtung resultieren. Bei Abbildung der aufgenommenen Szene in hochauflösenden optischen Bildern treten daher Überlagerungen von Objekten mit vertikaler Ausdehnung auf. Für Gebäude beispielsweise sind nicht nur die Gebäudedächer, sondern auch die Fassaden der Bauwerke in der Aufnahme abgebildet. Nur in Ausnahmefällen liegen Nadiraufnahmen vor, bei denen eine solche Überlagerung nicht auftritt,

wenn die Objekte der Szene exakt von oben aufgenommen werden. Da für Veränderungsanalysen auf Grundlage von optischen Bilddaten zwei zeitlich versetzte Aufnahmen erforderlich sind und in Krisensituationen oftmals keine Satellitenbilder desselben optischen Sensors mit derselben zugrundeliegenden Aufnahmegeometrie und Sonnenposition vorliegen, kommt es aufgrund der oben beschriebenen Abbildungseffekte von Objekten in optischen Satellitenbildern bei der eindeutigen Zuordnung von korrespondierenden Bildbereichen zu Ungenauigkeiten. Grund hierfür ist, dass zur Durchführung der Analyse die Objekt- bzw. Gebäudegeometrien in Abhängigkeit der Abbildungseffekte dem Bildinhalt richtig zugeordnet werden müssen [Leichtle u. a. 2016]. Je nach Einfallswinkel der Sensorstrahlen und Höhe des Gebäudes ergeben sich unterschiedliche geometrische Verzerrungen, wodurch auch die Sichtbarkeit der Gebäudefassaden im Satellitenbild variiert. Damit einhergehend differieren auch die Gebäudeumrisse mit der schrägen Aufnahme des Sensors und der Gebäudehöhe. Hinzu kommt, dass je nach Sonnenstand während der beiden zeitlich versetzten Aufnahmen die Gebäude im ersten Bild kürzere oder längere Schatten aufweisen können als die im zweiten Bild. Dadurch sind benachbarte Gebäude in einer Aufnahme durch Schatten verdeckt, wohingegen dies in der anderen Aufnahme nicht zwingend der Fall sein muss. Diese aufgeführten Tatsachen erschweren eine optimale Identifikation von miteinander korrespondierenden Bildbereichen und damit eine automatische Durchführung der Veränderungsanalyse für dicht besiedelte und schnell wachsende Gebiete [Leichtle u. a. 2016].

Im Hinblick auf die oben dargestellte Problematik ist eine Verbesserung der Durchführung von Veränderungsanalysen notwendig. Dafür soll der bestehende Simulator GeoRaySAR, der lediglich eine Simulation auf Basis von SAR Bildern realisieren kann, so erweitert werden, dass dieser auch Simulationen anhand hochauflösender optischer Daten durchführen kann (GeoRayOpt). Die gesamte Ausdehnung von Gebäudeblöcken oder Einzelgebäuden soll nicht nur für SAR Bilder, sondern auch für optische Satellitenbilder berechnet und simuliert werden. Für jedes Gebäude kann damit die genaue Geometrie (Gebäudeumriss), die den Grundriss des jeweiligen Gebäudes enthält, aus dem optischen Satellitenbild extrahiert werden. Durch diese Information ist es zum einen möglich, jeden Grundriss eindeutig einem Gebäude zuzuordnen. Zum anderen können über die Informationen, die sich aus den Simulationsergebnissen ergeben, die Bereiche innerhalb der Gebäudegeometrien, die zum Vergleich der korrespondierenden Bildbereiche herangezogen werden, eingegrenzt und damit verfeinert werden. Dadurch werden die verschiedenen Bauwerke in zeitlich versetzten Aufnahmen derselben Szene präziser zueinander in Beziehung gebracht. Eine Ergänzung des bestehenden Simulators um die Simulation auf Basis hochauflösender optischer Satellitenbilddaten stellt einen Fortschritt für die Veränderungsanalyse dar, da die Durchführung deutlich genauer und aussagekräftiger wird.

In dieser Arbeit soll untersucht werden, ob eine Simulationsumgebung um die Funktionalität zur Simulation optischer Bilddaten GeoRayOpt, gestützt auf das für Radarbilddaten verwendete Verfahren GeoRaySAR, erweitert werden kann, um damit die Simulation optischer Bilddaten zu ermöglichen. Die Simulationsergebnisse sollen anschließend auf ihre Relevanz zu den bestehenden Anwendungsmöglichkeiten untersucht werden.

1.3 Ziele der Arbeit

Das grundlegende Ziel dieser Masterarbeit ist die Verallgemeinerung und Erweiterung des bestehenden GeoRaySAR Simulators, so dass nicht nur Simulationen auf Basis von Radarbilddaten, sondern auch basierend auf hochauflösenden optischen Satellitendaten durchgeführt werden können. Dafür soll zunächst eine Einarbeitung in GeoRaySAR stattfinden, um das Programm und dessen Funktionalität zu verstehen und eine Übertragbarkeit auf optische Bilddaten zu prüfen. Anschließend sollen die identifizierten Unterschiede für eine Simulation mit optischen Bilddaten ergänzend implementiert werden. Als Grundlage für die Szenensimulation soll sowohl die Geometrie des Objekts (digitales 3D Modell) als auch die radiometrische Komponente und die Parameter bezüglich der Aufnahmegeometrie (Metadaten einer optischen Satellitenaufnahme) verwendet werden. Die Durchführung der Simulationen soll vollautomatisch stattfinden und über das Resultat eines geokodierten simulierten Bildes den Vergleich mit dem originalen optischen Satellitenbild ermöglichen. Der erweiterte Simulator, der sowohl SAR als auch hochauflösende optische Satellitenbilddaten für eine Simulation nutzen kann, wird mit **Geocoding extended Ray Tracing based Image** simulator (GeoRayImg) bezeichnet.

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit besteht darin, die Simulationsergebnisse, die aus dem neu erstellten Simulator GeoRayOpt resultieren, zu nutzen, um Informationen zur Interpretation und Analyse der betrachteten Szene zu extrahieren. Dafür sollen auf Grundlage verschiedener digitaler Modelle (DOM, DGM und nDOM), welche die Geometrie der Szene unterschiedlich darstellen, verschiedene Simulationsergebnisse erzeugt werden. Durch deren Kombination sollen im Anschluss Binärbildmasken generiert werden, mittels derer den einzelnen Bildbereichen eine Semantik zugeordnet werden kann.

Für den Aufbau der vollautomatisierten Simulationsumgebung sollen verschiedene, zum Teil nicht im Zuge dieser Masterarbeit, entwickelte und implementierte Module in die Simulationsumgebung integriert werden. Dadurch soll die Möglichkeit geschaffen werden, lediglich durch Eingabe der zwei wesentlichen Eingangsdaten, einem DOM und einem Satellitenbild, automatisch Binärbildmasken zu generieren, die zur Szeneninterpretation herangezogen werden können. Die Simulationsumgebung soll, je nach Eingangsdaten, eine Szeneninterpretation von Satellitenaufnahmen unterschiedlicher Sensortypen (optisch oder SAR) vornehmen.

Nach der Durchführung, Diskussion und Bewertung szenariobasierter Fallstudien stellt die Erarbeitung von Anwendungsmöglichkeiten, für die die Beschreibung optischer Satellitenbildbereiche von Nutzen sein kann, das letzte Ziel dieser Arbeit dar.

1.4 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Masterarbeit ist in insgesamt acht Kapitel unterteilt. In Kapitel 2 werden verschiedene relevante Grundlagen erörtert. Dabei wird in Abschnitt 2.1 der bereits bestehende Simulator GeoRaySAR näher erläutert, der als Grundlage für den optischen Simulator GeoRayOpt dient und um diesen erweitert werden soll. Anschließend erfolgt in Abschnitt 2.2 eine kurze Beschreibung der zur Durchführung der Machbarkeitsstudie verwendeten Programmiersprache (vgl. Abschnitt 2.2.1)

und notwendigen Programme (vgl. Abschnitt 2.2.2 und 2.2.3). Zur Ermittlung wichtiger Metadaten, die für eine Simulation basierend auf optischen Satellitenbilddaten essentiell sind, sind so genannte **Rational Polynomial Coefficients** (RPCs) erforderlich. Auf diese wird in Abschnitt 2.3 näher eingegangen.

Im Anschluss wird in Kapitel 3 die entwickelte Methodik im Detail erläutert. Dabei stellt Abschnitt 3.1 die erarbeitete, vollautomatisierte verallgemeinerte Simulationsumgebung dar. Dem nachfolgend werden die im Simulator GeoRayOpt durchzuführenden Berechnungen und Festlegungen zur Simulation auf Basis optischer Satellitenbilddaten in einzelnen Schritten aufgeführt (vgl. Abschnitt 3.2.1 bis 3.2.5). In Abschnitt 3.3 werden die verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten der Simulationsparameter erklärt, die sich durch den erweiterten Simulator GeoRayImg ergeben.

Da für diese Masterarbeit die Bilddaten der drei optischen Sensoren **QuickBird-2** (QB2), **Pléiades High Resolution-1B** (PHR1B) und **WorldView-2** (WV2) zur Durchführung der Fallstudien herangezogen werden, werden diese in Abschnitt 4.1 allgemein beschrieben und deren Lokalisationsgenauigkeit angegeben. Als Nächstes werden die zur Durchführung szenariobasierter Fallstudien ausgewählten Datensätze der beiden Testgebiete München und Dongying vorgestellt. (vgl. Abschnitt 4.2)

Anschließend können in Kapitel 5 die Simulationsergebnisse für das Testgebiet München (vgl. Abschnitt 5.1) dargestellt werden, die in Abschnitt 5.2 zur Generierung von Binärbildmasken für eine visuelle Interpretation der Bilddaten miteinander kombiniert werden. Daraufhin werden die Resultate, die für das zweite Testgebiet (Dongying) aus GeoRayOpt resultieren, kurz dargestellt (vgl. Abschnitt 5.3). Danach wird zur Diskussion und Bewertung der Simulationsergebnisse auf limitierende Faktoren eingegangen (vgl. Abschnitt 5.4).

Anwendungsmöglichkeiten der Resultate aus dem erweiterten Simulator GeoRayOpt werden in Kapitel 6 aufgeführt. Dabei werden zuerst die Verbesserungsmöglichkeiten von Veränderungsanalysen anhand des Testgebiets Dongying veranschaulicht (vgl. Abschnitt 6.1). Danach erfolgt in Abschnitt 6.2 eine kurze Erläuterung zur objektbasierten Klassifikation von optischen Satellitenbildern. Als letzte Anwendungsmöglichkeit wird die Kombination von Simulationsergebnissen aus GeoRaySAR und GeoRayOpt (vgl. Abschnitt 6.3) aufgezeigt.

Den Abschluss bilden Kapitel 7 mit einer zusammenfassenden Erläuterung der wichtigsten Aspekte und Kapitel 8 durch die Aufführung weiterer Möglichkeiten, die vollautomatisierte Simulationsumgebung zu nutzen, zu ergänzen und zu verbessern.

Kapitel 2

Grundlagen

Dieses Kapitel beschreibt die relevanten Grundlagen der Arbeit. Neben der Erläuterung des Simulators GeoRaySAR werden die verwendete Programmiersprache Python und die notwendigen Programme XDibias und POV-Ray vorgestellt sowie die RPCs erörtert.

2.1 Bestehender Simulator GeoRaySAR

Die Prozesskette der vollautomatisierten Simulation von SAR Bilddaten mittels GeoRaySAR ist in Abb. 2.1 dargestellt. Als Datengrundlage dient zum einen ein Radarbild, das in diesem Fall vom Sensor des TSX Satelliten stammt. Zum anderen geht ein auf LiDAR Daten basierendes digitales Modell, bei welchem es sich entweder um ein DOM, ein DGM oder ein nDOM handeln kann, als Input in den Simulator ein. Aus diesen Eingangsdaten werden die für die Simulation notwendigen Geoinformationen und Parameter zur Aufnahmegeometrie der Szene entnommen und in einer .pov Datei abgespeichert. Die .pov Datei stellt die für den verwendeten RaySAR Simulator notwendige Datenstruktur dar. Die Technische Universität München (TUM) hat RaySAR am Lehrstuhl für Methodik der Fernerkundung entwickelt, wobei dieser auf einer erweiterten Form der frei zugänglichen Ray Tracing Software POV-Ray beruht (vgl. Abschnitt 2.2.3) [Tao u. a. 2014]. RaySAR bietet folgende Funktionalitäten [Auer 2011]:

- 3D Simulationen
- Unterscheidung verschiedener Reflexionen (Einfach- und Doppelreflexionen)
- Identifikation des Ursprungs der reflektierten Signale
- Verfügbarkeit unterschiedlicher Datenschnittstellen

Die genaue Vorgehensweise für die Simulation eines SAR Bildes ist [Auer u. a. 2010] zu entnehmen. Nach Generierung des simulierten Bildes wird dieses vollautomatisch geokodiert, so dass ein direkter Vergleich mit dem originalen SAR Bild möglich ist. Zur Geokodierung des simulierten

Bildes werden die geometrischen Informationen des jeweiligen digitalen Modells und die Aufnahmeparameter des TSX Bildes herangezogen. Details zum Algorithmus von GeoRaySAR können [Tao u. a. 2014] entnommen werden.

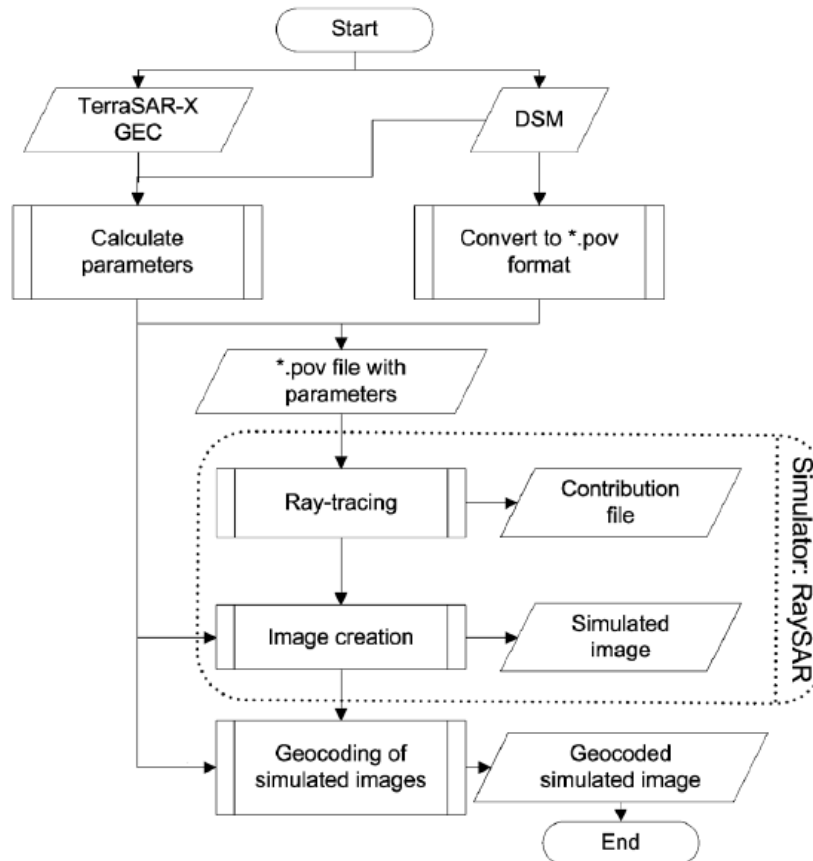


Abbildung 2.1 – Prozesskette der vollautomatischen Simulation in GeoRaySAR [Tao u. a. 2014], abgeändert

Ein großer Vorteil der entwickelten Methode ist, dass in der Simulation die in SAR Bildern auftretenden Einfach- und Zweifachreflexionen getrennt voneinander betrachtet werden können, was im realen SAR Bild nicht möglich ist [Tao u. a. 2011]. Dadurch können Bilder simuliert werden, die entweder nur die Doppelreflexionen oder nur die Einfachreflexionen oder beide Reflexionen zusammen darstellen. Wie oben bereits erwähnt, kann das digitale Modell zwischen einem DOM, einem DGM oder einem nDOM variieren. Werden die Simulationen separat für jedes der drei Modelle durchgeführt, können im Anschluss durch Kombination der verschiedenen Simulationsergebnisse Binärbildmasken zur visuellen Analyse erstellt werden (vgl. Abb. 2.2). Dabei werden zwei Layer generiert, die zeigen, welchen Bereich der Layover und der Radarschatten des Gebäudes im realen SAR Bild einnehmen. Außerdem kann der Bodenbereich, das heißt der Bereich, der nicht zum Gebäude gehört, in einer Maske identifiziert werden. Zudem wird die Möglichkeit geboten, einen Layer zu erzeugen, der lediglich die Doppelreflexionen, die im realen SAR Bild als sehr helle Linien erscheinen, beinhaltet. Da Doppelreflexionen vorwiegend an Gebäudegrenzen und Fenstern oder Balkonen auftreten, lassen sich über die erstellte Binärbildmaske Gebäudegrenzen detektieren und auf Details an Gebäudefassaden schließen [Tao u. a. 2014]. Die über die verschiedenen

Binärbildmasken extrahierten Informationen aus dem Radarbild können dazu genutzt werden, den verschiedenen Bildbereichen eine Semantik zuzuordnen. Mit Hilfe des Wissens, wo im SAR Bild welche Inhalte zu finden sind, wird die Analyse und Interpretation von Szenen in städtischen Gebieten unterstützt.

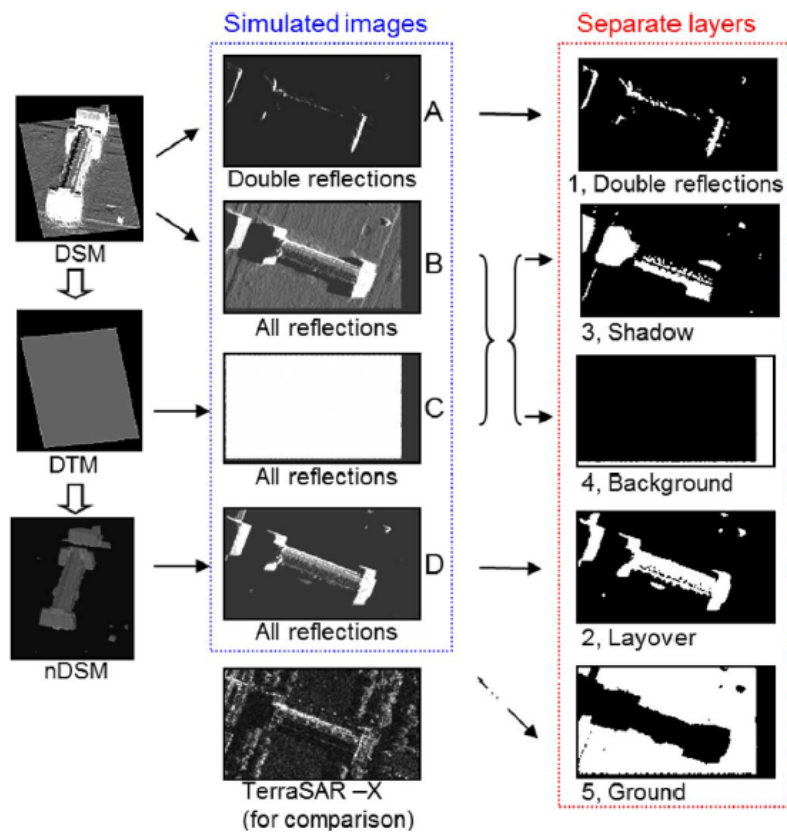


Abbildung 2.2 – Layergenerierung mittels verschiedener Simulationsergebnisse aus GeoRaySAR am Beispiel der Alten Pinakothek in München [Tao u. a. 2014]

2.2 Verwendete Programme

Nach Beschreibung des Simulators GeoRaySAR wird in Abschnitt 2.2.1 die zur Entwicklung der Methodik verwendete Programmiersprache Python erläutert und auf deren Entwicklungsumgebung PyCharm eingegangen. Daraufhin wird die digitale Bildverarbeitungssoftware XDiBias vorgestellt (vgl. Abschnitt 2.2.2) und das Prinzip des Ray Tracings in der Software POV-Ray beschrieben (vgl. Abschnitt 2.2.3).

2.2.1 Programmiersprache Python und deren Entwicklungsumgebung PyCharm

Die Implementierung der vollautomatischen Simulationsumgebung findet in der Programmiersprache Python, Version 2.7.3 statt, welche einige Vorteile mit sich bringt. Es handelt sich um eine

open-source basierte Programmiersprache, die aufgrund ihrer Einfachheit erlaubt, komplexe Programme für verschiedenste Anwendungen zu erstellen und Programmbibliotheken anderer Entwickler einzubinden. Die eindeutige Syntax und die klaren Strukturen von Python ermöglichen eine übersichtliche und logische Programmierarbeit und die Umsetzung von Programmierparadigmen, wie beispielsweise Modularität und Datenkapselung. Zum anderen ist die Programmiersprache Python unabhängig vom jeweiligen verwendeten Betriebssystem, so dass sie sowohl auf Windows, als auch auf Ubuntu Linux oder OS X verwendet werden kann [Theis 2014]. Zur Interpretation des Python Quellcodes stehen verschiedene Compiler zur Verfügung, die unter <https://wiki.python.org/moin/PythonEditors> tabellarisch für unterschiedliche Betriebssysteme aufgelistet sind. Zur Entwicklung der Simulationsumgebung wird für die Übersetzung des programmierten Python Codes der Compiler PyCharm (JetBrains) verwendet und auf der Plattform Ubuntu Linux gearbeitet.

2.2.2 Digitales Bildverarbeitungssystem XDibias

Extended Digital Interactive Bavarian Image Analysis System (XDibias) ist eine vom Institut für Methodik der Fernerkundung (IMF), Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) entwickelte digitale Bildverarbeitungssoftware zur Auswertung, Analyse, Verarbeitung und dreidimensionalen Darstellung von Fernerkundungsdaten [Müller 2016]. Hierfür stellt XDibias ein Visualisierungswerkzeug und eine Vielzahl von Bildverarbeitungsmodulen, beispielsweise für radiometrische Korrekturen, geometrische Verarbeitungen oder multispektrale Klassifikationen von Bildern, zur Verfügung [Fruth 2016]. Im Gegensatz zur Programmiersprache Python (vgl. Abschnitt 2.2.1) läuft XDibias lediglich unter Linux Plattformen, was dessen Verwendung etwas einschränkt [Müller 2016]. In dieser Arbeit wird das Softwaresystem zum einen im Zuge des vorverarbeitenden Moduls (vgl. [Ilehag 2016]) zur Berechnung eines DGMs und nDOMs auf Basis eines DOMs (vgl. Abschnitt 4.2.3) herangezogen. Zum anderen dient es zum Einlesen von Bilddaten in Python. Dafür müssen die jeweiligen einzulesenden Daten im XDibias Datenformat vorliegen. Bei diesem handelt es sich um ein internes .txt Metadatenformat, das die Programme am Earth Observation Center (EOC) des DLR benutzen. Grund hierfür ist, dass jeder Satellitenbetreiber verschiedene Metadatenformate benutzt. Die Metadaten werden in das interne XDibias Format konvertiert, um eine Einheitlichkeit herzustellen und um sicherzustellen, dass die Programme am EOC damit arbeiten können. Das XDibias Datenformat setzt sich aus folgenden fünf Dateien zusammen [Stätter 2009]:

- *_img*:
Diese Datei beinhaltet die graphischen Daten, die das Bild darstellen.
- *_aux*:
Die Datei *_aux* enthält alle geometrischen und radiometrischen Informationen zum Bild. Der Bildinhalt wird darin durch folgende Bildmetadaten beschrieben:
 - Georeferenzierte X -, Y - und Z -Koordinate der Mitte des linken oberen Bildpixels
 - Anzahl an Zeilen und Spalten

- Anzahl an Kanälen
 - Bits pro Kanal (Digitalisierung)
 - Pixelauflösung in X -, Y - und Z -Richtung
 - Aufnahmedatum und Aufnahmezeit
 - Informationen zum Hintergrund
 - UTM Zone
 - Name der Datei bzw. des Bildes
 - Quantisierungstyp
- `_vec`:
Diese Datei stellt das Vektorverzeichnis dar, das alle Vektordaten beinhaltet.
 - `_prv`:
Zur Vorinformation ist in der Datei `_prv` ein Preview Bild enthalten, das dem Anwender eine Vorschau in Form eines schwarz-weiß Binärbildes bezüglich der jeweiligen Bilddatei geben soll.
 - `_cpdb`:
In dieser Datei werden homologe Bildpunkte, das heißt korrespondierende Punkte in 2 verschiedenen Bildern, aufgeführt (*cpdb* = *correlation point database*).

Die wesentlichen Daten, die ein XDibias Bild für die Verwendung in GeoRayOpt enthalten muss, sind die geometrischen Daten in der `_aux` Datei, da mit den darin enthaltenen Metadaten des jeweiligen Bildes die Aufnahmegeometrie für die Simulation nachgebildet wird. Zum Vergleich des Simulationsergebnisses mit dem originalen georeferenzierten optischen Satellitenbild müssen zusätzlich die graphischen Daten (`_img` Datei) vorhanden sein.

2.2.3 Ray Tracing Software POV-Ray

Die Ray Tracing Software POV-Ray ist eine hochqualitative frei verfügbare Software zur Erstellung von dreidimensionalen Graphiken und photorealistischen Bildern. Die Informationen, die dabei zur Generierung von Bildern notwendig sind, werden der Software in Form einer `.pov` Datei übergeben. Darin ist die abzubildende Szene mit Hilfe einer Software eigenen Szenen-Beschreibungssprache definiert. Die Daten, die dem 3D Computergraphikprogramm zum Rendern von Bildern zugrunde liegen, basieren auf mathematischen Formeln. Der limitierende Faktor des Ray Tracers liegt im hohen Rechenaufwand, der für das Rendering aufgebracht werden muss. Je nach Größe der zu rendernden Szene kann die Rechenzeit eine Dauer von wenigen Minuten, über einige Stunden bis hin zu Tagen in Anspruch nehmen [Persistence of Vision Raytracer Pty. Ltd. 2008].

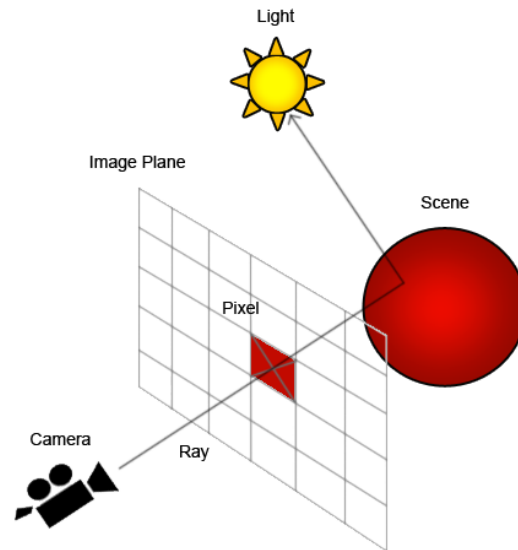


Abbildung 2.3 – Ray Tracing [Rodgers 2014]

Dadurch, dass das von der Sonne abgestrahlte Licht an verschiedenen Oberflächen auf der Erde reflektiert wird, gelangt ein Teil des Sonnenlichts zum menschlichen Auge, so dass dieses seine Umgebung wahrnehmen kann. Genau diesen Vorgang bildet der Ray Tracer nach, um so ein möglichst realistisches Bild einer Szene zu simulieren. Für die Nachbildung von unbegrenzt vielen Lichtstrahlen, die durch die Sonne abstrahlt werden, von denen jedoch nur ein Bruchteil am Auge eintreffen, ist die Rechenkapazität von Computern nicht ausreichend. Aus diesem Grund erfolgt beim Ray Tracing keine Vorwärts-, sondern eine Rückwärtsverfolgung der Strahlen. Abb. 2.3 verdeutlicht diesen Vorgang, wobei nun das menschliche Auge durch eine virtuelle Kamera ersetzt wird. Somit wird in POV-Ray zwischen die Kamera und der abzubildenden 3D Szene eine 2D Bildebene mit einer bestimmten Anzahl von Pixeln gelegt. Für jedes darin befindliche Pixel wird anschließend von der Position der Kamera ein Strahl ausgesendet. Trifft der Strahl in der Szene auf die Oberfläche eines Objekts auf und wird dadurch reflektiert, wird für das jeweilige Pixel in der 2D Bildebene der Grauwert basierend auf den Material- und Oberflächeneigenschaften des Objekts und der Beleuchtung der Szene berechnet. Nachdem das Ray Tracing für jedes Pixel in der Bildebene durchgeführt ist, resultiert ein realistisch simuliertes Bild der aufgenommenen Szene [Rodgers 2014].

2.3 Rational Polynomial Coefficients (RPCs)

Da für die Entwicklung und Implementierung des Simulators GeoRayOpt, auf die in Abschnitt 3.2 näher eingegangen wird, RPCs erforderlich sind, sollen diese in diesem Abschnitt kurz beschrieben werden. Bei RPCs handelt es sich um ein so genanntes „Replacement Camera Model“, zu deutsch „Ersatzkameramodell“ [Dial u. Grodecki 2005]. Die Funktionsweise eines solchen Ersatzkameramodells ist in Abb. 2.4 schematisch dargestellt.

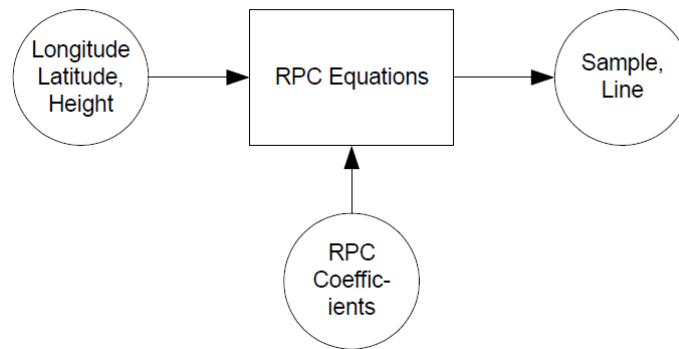


Abbildung 2.4 – Schematische Darstellung der Funktionsweise des RPC Kameramodells [Dial u. Grodecki 2005]

Über einen allgemein formulierten Satz von RPC Gleichungen stellt das Ersatzkameramodell die Beziehung zwischen einem 3D Raumpunkt und einem 2D Bildpunkt allgemein dar, wodurch der Abbildungsprozess einer physikalischen Kamera nachgebildet wird [Dial u. Grodecki 2005]. Die vom jeweiligen Satellitenbetreiber in den Bildmetadaten mitgelieferten RPCs setzen sich aus 20, für jedes Sensorsystem individuellen Koeffizienten zusammen, die das physikalische Sensormodell mit innerer und äußerer Orientierung ersetzen [Schindler 2016]. Durch Einsetzen der gegebenen individuellen Koeffizienten in die allgemein definierten RPC Gleichungen kann ein 3D Raumpunkt für ein bestimmtes Sensorsystem in einen 2D Bildpunkt projiziert werden und umgekehrt [Dial u. Grodecki 2005]. Die genauen Formeln für die Berechnungen, die im RPC Kameramodell durchgeführt werden, sind [Dial u. Grodecki 2005] und [DigitalGlobe 2014] zu entnehmen.

Kapitel 3

Methodik

In diesem Kapitel wird zunächst auf den Ablauf der vollautomatischen Simulationsumgebung eingegangen. Im Anschluss werden die einzelnen Prozessierungsschritte des entwickelten Simulators GeoRayOpt im Detail erläutert und durch Graphiken veranschaulicht. Die verwendeten Symbole sind über die im Symbolverzeichnis angegebenen Variablen und Indices eindeutig beschrieben. Die Kombinationsmöglichkeiten verschiedener Inputs, die sich nach Ergänzung von GeoRaySAR um GeoRayOpt zur Durchführung von Simulationen ergeben und das damit erweiterte Potential von GeoRayImg ist im letzten Abschnitt dargestellt.

3.1 Ablauf der vollautomatischen Simulationsumgebung

Als Übersicht ist in Abb. 3.1 der Ablauf der einzelnen Prozessierungsschritte der vollautomatischen Simulationsumgebung allgemein gezeigt. Dabei sind die Teile des Ablaufdiagramms, welche in dieser Masterarbeit entwickelt werden, rot gekennzeichnet. Der Teil der Vorprozessierung wurde in [Illehaag 2016] entwickelt und lediglich in die vollautomatische Prozessierungskette integriert. Der bereits existierende Simulator zur Durchführung von Simulationen auf Basis von SAR Bilddaten wird in [Tao 2015] erarbeitet und ebenfalls als Bestandteil der Simulationsumgebung verwendet. Die rot eingefärbten Pfeile sollen die Integration der Module und damit die Erstellung einer vollautomatisierten Simulationsumgebung verdeutlichen.

Die beiden wesentlichen Inputs, die zu Beginn der Simulationsumgebung angegeben werden müssen, ist ein DOM und eine Satellitenaufnahme. Je nachdem welche Art von DOM als Input dient (LiDAR oder optisch), muss der Anwender zusätzlich eine Filterung aktivieren oder deaktivieren. Wird die Filterung aktiviert, ist neben den beiden eben erwähnten Eingangsdaten zudem eine Multispektralaufnahme der Szene notwendig. Wird auf eine Filterung verzichtet, sind die Multispektraldaten für den weiteren Ablauf nicht relevant. Zusätzlich müssen noch einige Festlegungen, wie zum Beispiel die Abspeicherung von Zwischenergebnissen, über verschiedene Parameter zu Beginn des Python Quellcodes der Simulationsumgebung vorgenommen werden. Welche weiteren Einstellungen dabei bezüglich der Eingangsparameter erforderlich sind, ist dem der Masterarbeit zugehörigen Python Quellcode und dessen Beschreibung ('readme') zu entnehmen.

Auf Basis des eingehenden DOMs wird über das Vorverarbeitungsmoduls von [Ilehag 2016] ein DGM und nDOM erstellt. Ist die Filterung in den Eingabeparametern aktiviert, werden zusätzlich ein vorprozessiertes DOM und nDOM erzeugt. Die erstellten digitalen Modelle werden im Anschluss nacheinander an den Simulator GeoRayImg übergeben. Anhand des eingehenden Satellitenbildes wird während der Prozessierung automatisch entschieden, welcher der beiden Simulatoren (GeoRaySAR oder GeoRayOpt) zur Simulation herangezogen wird. Geht ein Radarbild als Input in die Simulationsumgebung ein, kommt der bereits existierende GeoRaySAR Simulator zum Einsatz. Liegt hingegen eine Satellitenaufnahme eines optischen Sensors vor, wird der neu entwickelte Simulator GeoRayOpt aufgerufen und zur Durchführung der Simulationen herangezogen. Durch mehrmaligen Aufruf des festgelegten Simulators werden die verschiedenen digitalen Modelle unter Verwendung der Bildmetadaten des eingehenden Satellitenbildes simuliert. Die jeweiligen resultierenden Simulationsergebnisse werden im Anschluss so miteinander kombiniert, dass verschiedene Binärbildmasken zur Bildanalyse generiert werden (Layergenerierung).

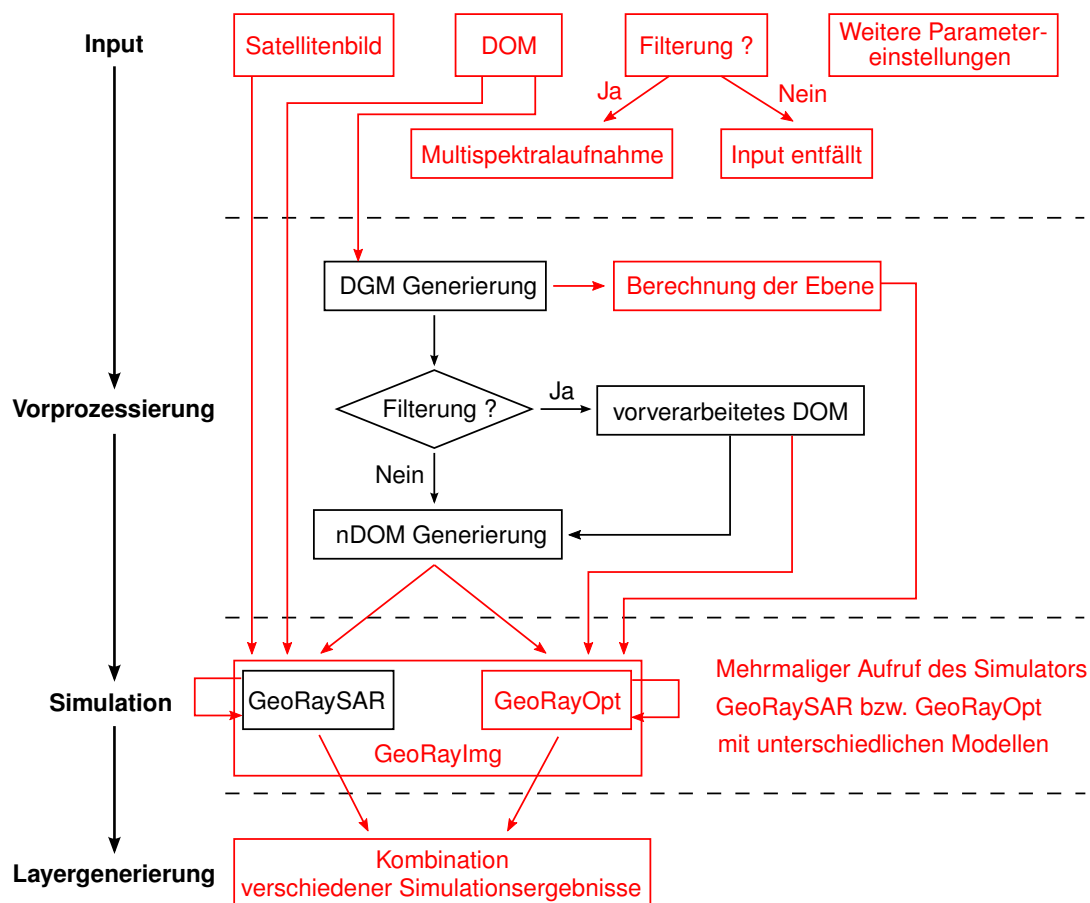


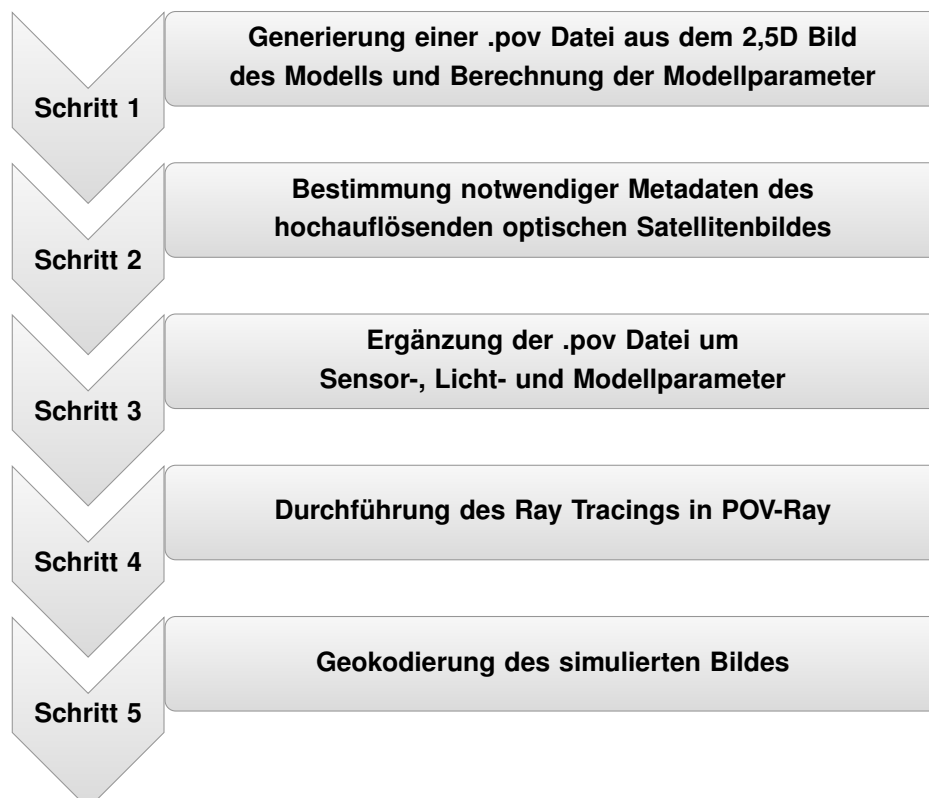
Abbildung 3.1 – Ablauf der vollautomatischen Simulationsumgebung; rot: Entwickelte und implementierte Methodik

3.2 Simulator GeoRayOpt

In diesem Abschnitt wird detailliert auf die entwickelte Methodik des GeoRayOpt Simulators eingegangen, der es ermöglicht, Simulationen basierend auf hochauflösenden optischen Satellitenbilddaten durchzuführen. Als Grundlage für die Erstellung des Simulators dient der in einer Dissertation entwickelte GeoRaySAR Simulator, dessen Funktionalität in [Tao 2015] detailliert beschrieben ist. Die Arbeiten beruhen auf dem zugehörigen Python Programmiercode, dessen Struktur verallgemeinert und um die optische Komponente ergänzt wird.

Die beiden wesentlichen Inputs, die der GeoRayOpt Simulator benötigt, sind eine hochauflösende optische Satellitenaufnahme und ein digitales Modell, wobei beide dieselbe Szene darstellen müssen. Das Satellitenbild liefert dabei über die zugrundeliegenden Metadaten, wie zum Beispiel Einfallswinkel, Blickwinkel und Sonnenstand, die Informationen bezüglich der Aufnahmegeometrie und der Beleuchtung während der Bilderfassung der Szene. Das digitale Modell hingegen stellt zum einen die für die Simulation notwendige Geometrie bereit, zum anderen wird es für die Geokodierung benötigt, um dem simulierten Ergebnisbild am Ende UTM Koordinaten zuzuordnen. Das digitale Modell beschreibt entweder ein DOM, ein DGM oder ein nDOM, wobei jedes der Modelle die Geometrie der Szene in einer anderen Art und Weise darstellt. Je nachdem welches digitale Modell als Input in den Simulator eingeht, resultieren unterschiedliche Simulationsergebnisse der Szene.

Die Simulation auf Basis von hochauflösenden optischen Bilddaten wird, wie im nachfolgenden Schaubild dargestellt, im Wesentlichen in fünf Schritten durchgeführt. Diese werden in den Abschnitten 3.2.1 bis 3.2.5 näher erläutert.



3.2.1 Generierung einer .pov Datei aus dem 2,5D Bild des Modells und Berechnung der Modellparameter

Zunächst wird das digitale Modell über die Bildverarbeitungssoftware XDibias in Python eingelesen. Voraussetzung hierfür ist, dass die Daten des Modells im entsprechenden XDibias Datenformat vorliegen (vgl. Abschnitt 2.2.2).

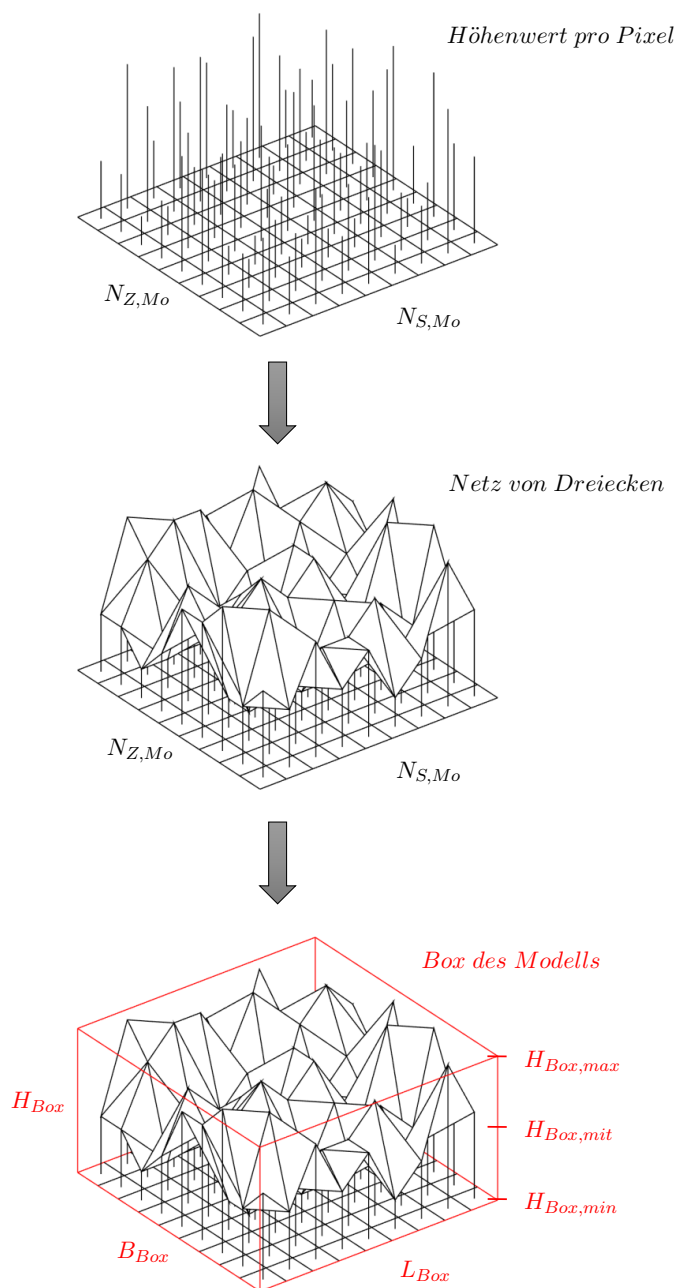


Abbildung 3.2 – Generierung eines 3D Modells aus dem 2,5D Bild des Modells

Wie in Abb. 3.2 dargestellt, handelt es sich bei dem eingelesenen Modell um ein 2,5D Bild, bei dem jedes Pixel einen zugehörigen Höhenwert besitzt. Da für die Simulation in POV-Ray jedoch eine geschlossene Oberfläche erforderlich ist, mit der die ausgesendeten Strahlen der Kamera geschnitten werden können, muss auf Basis der gegebenen diskreten Punkte eine Triangulation durchgeführt werden. Dabei wird unterschieden, ob für das gesamte Modell Daten vorhanden sind oder ob sich einzelne Löcher im eingegebenen Modell befinden und somit keine flächendeckenden Daten gegeben sind. Letzteres ist beispielsweise bei nDOMs der Fall, da hier nur erhabene Objekte (Gebäude) ohne Geländefläche abgebildet werden. Anhand des in den Metadaten des Modells angegebenen Hintergrundwertes wird über die Füllung der Lücken in den Daten entschieden. Liegt in den Metadaten des Modells ein Parameter vor, der den Hintergrund des Modells beschreibt, wird dieser herangezogen, um die Löcher im Modell zu schließen. Befindet sich hingegen keine Information bezüglich des Hintergrunds in den Metadaten, wird an den fehlenden Datenstellen eine Null gesetzt. Nachdem das gesamte Modell mit Daten gefüllt ist, wird zwischen je drei benachbarten Höhenwerten trianguliert, um aus dem 2,5D Bild des Modells ein 3D Modell zu erstellen (vgl. Abb. 3.2). Es entstehen zusammenhängende Dreiecke, die eine geschlossene Oberfläche bilden und damit ein 3D Modell darstellen. Diese geschlossene Oberfläche dient beim Ray Tracing (vgl. Abschnitt 2.2.3 und 3.2.4) als Schnittfläche für die verfolgten Strahlen, die von der Kamera in die Szene geschickt werden.

Tabelle 3.1 – Tabellarischer Aufbau der Pixelhöhenwerte des Modells in der .pov Datei

	Spalte 1	Spalte 2	Spalte 3
Zeile 1	0	H_1	0
Zeile 2	1	H_2	0
Zeile 3	2	H_3	0
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
Zeile $N_{S,Mo}$	$N_{S,Mo} - 1$	$H_{N_{S,Mo}}$	0
Zeile $N_{S,Mo} + 1$	0	$H_{N_{S,Mo}+1}$	1
Zeile $N_{S,Mo} + 2$	1	$H_{N_{S,Mo}+2}$	1
Zeile $N_{S,Mo} + 3$	2	$H_{N_{S,Mo}+3}$	1
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
Zeile $2 \cdot N_{S,Mo}$	$N_{S,Mo} - 1$	$H_{2 \cdot N_{S,Mo}}$	1
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
Zeile $(N_{S,Mo} \cdot (N_{Z,Mo} - 1)) + 1$	0	$H_{(N_{S,Mo} \cdot (N_{Z,Mo} - 1)) + 1}$	$N_{Z,Mo} - 1$
Zeile $(N_{S,Mo} \cdot (N_{Z,Mo} - 1)) + 2$	1	$H_{(N_{S,Mo} \cdot (N_{Z,Mo} - 1)) + 2}$	$N_{Z,Mo} - 1$
Zeile $(N_{S,Mo} \cdot (N_{Z,Mo} - 1)) + 3$	2	$H_{(N_{S,Mo} \cdot (N_{Z,Mo} - 1)) + 3}$	$N_{Z,Mo} - 1$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
Zeile $N_{S,Mo} \cdot N_{Z,Mo}$	$N_{S,Mo} - 1$	$H_{N_{S,Mo} \cdot N_{Z,Mo}}$	$N_{Z,Mo} - 1$

Um zusätzlich sicherzustellen, dass die zur Simulation in POV-Ray benötigten Informationen in einem Format vorliegen, das die Ray Tracing Software lesen und verarbeiten kann, werden sowohl die Höhenwerte der einzelnen Pixel des 2,5D Bildes als auch die aus der Triangulation resultierenden Dreiecke in eine .pov Datei geschrieben. Diese ist zunächst aus zwei Teilen aufgebaut. Wie in Tab. 3.1 graphisch veranschaulicht, beschreibt der erste Teil der .pov Datei die Pixelhöhenwerte, die in einer Tabelle mit drei Spalten und $N_{S,Mo} \cdot N_{Z,Mo}$ Zeilen vorliegen. Dabei bezeichnet $N_{S,Mo}$ die Anzahl der Spalten und $N_{Z,Mo}$ die Anzahl der Zeilen des 2,5D Bildes des Modells. In Spalte 1 der Tabelle sind die Indices für die Spalten des 2,5D Bildes aufgelistet, wohingegen in Spalte 3 die Indices für die Zeilen des 2,5D Bildes aufgeführt sind. Die jeweiligen zugehörigen Höhenwerte H_i befinden sich in Spalte 2 und weisen dieselbe Einheit wie die Pixelauflösung des Modells in der Höhe $PS_{H,Mo}$ auf. Es stehen in Zeile 1 bis $N_{S,Mo}$ der Tabelle die Höhenwerte für alle Pixel der ersten Zeile des 2,5D Bildes (Index 0) und in Zeile $N_{S,Mo} + 1$ bis $2 \cdot N_{S,Mo}$ die Höhenwerte aller Pixel der zweiten Zeile des 2,5D Bildes (Index 1). Diese Auflistung setzt sich für jede Zeile des 2,5D Bildes in demselben Schema fort, bis in Zeile $(N_{S,Mo} \cdot (N_{Z,Mo} - 1)) + 1$ bis $N_{S,Mo} \cdot N_{Z,Mo}$ der Tabelle die Höhenwerte für jedes Pixel der letzten Zeile des 2,5D Bildes (Index $N_{Z,Mo} - 1$) aufgeführt sind. Im zweiten Teil der .pov Datei sind die ebenfalls tabellarisch aufgelisteten verschiedenen Kombinationen von jeweils drei Höhenwerten dreier Pixel enthalten, die zusammen ein Dreieck der Triangulation definieren.

Für die Berechnungen, die zur Durchführung der Simulation notwendig sind, wird gedanklich eine Box um das triangulierte Modell aufgespannt (vgl. Abb. 3.2). Diese stellt den kleinsten räumlichen Körper dar, der das Modell beinhaltet, und erleichtert die nachfolgenden Berechnungen. Die maximale Höhe der Box $H_{Box,max}$ entspricht dem maximalen Höhenwert H_{max} , der im 2,5D Bild des Modells vorkommt. Dementsprechend ergibt sich die minimale Höhe der Box $H_{Box,min}$ aus dem kleinsten Höhenwert H_{min} , den ein Pixel des Modells besitzt. Die mittlere Höhe $H_{Box,mit}$ und absolute Höhe H_{Box} der Box lassen sich aus deren maximalen und minimalen Höhe über Formel 3.1 und 3.2 errechnen.

$$H_{Box,mit} = \frac{(H_{Box,max} + H_{Box,min})}{2} \quad \text{m} \quad (3.1)$$

$$H_{Box} = H_{Box,max} - H_{Box,min} \quad \text{m} \quad (3.2)$$

Durch Multiplikation der Anzahl der Spalten $N_{S,Mo}$ (bzw. Zeilen $N_{Z,Mo}$) des Modells mit der Auflösung eines Pixels entlang der Spalten $PS_{S,Mo}$ (bzw. Zeilen $PS_{Z,Mo}$) des Modells kann die Ausdehnung der Box in Länge L_{Box} (bzw. Breite B_{Box}) über die Größe des 2,5D Bildes bestimmt werden (vgl. Formel 3.3 und 3.4).

$$L_{Box} = N_{S,Mo} \cdot PS_{S,Mo} \quad \text{m} \quad (3.3)$$

$$B_{Box} = N_{Z,Mo} \cdot PS_{Z,Mo} \quad \text{m} \quad (3.4)$$

3.2.2 Bestimmung notwendiger Metadaten des hochauflösenden optischen Satellitenbildes

Neben der in Formel 3.1 bis 3.4 angegebenen Größen der Box sind für die Berechnungen bezüglich der Simulation in GeoRayOpt zudem einige Metadaten des hochauflösenden optischen Satellitenbildes notwendig, um die Geometrie während der Bildaufnahme nachzubilden. Daher wird in diesem Abschnitt die Ermittlung der beiden für die Simulation unabdingbaren Parameter β (Blickwinkel) und θ_{Bo} (Einfallswinkel der Sensorstrahlen am Boden) beschrieben.

Blickwinkel β

Der Azimutwinkel (Heading-Winkel) des Sensors α_{Se} gibt den Winkel in der horizontalen Ebene an, den die Flugrichtung des Satelliten im Uhrzeigersinn in Bezug auf Nord einnimmt. Wie in Abb. 3.3 zu sehen ist, kann dabei zwischen einem aufsteigenden (vgl. Abb. 3.3(a)) und einem absteigenden (vgl. Abb. 3.3(b)) Orbit unterschieden werden. Bei Ersterem weist der Satellit eine von Süd nach Nord verlaufende Flugbahn auf, so dass der Azimutwinkel entweder zwischen 0° und 90° (α_{Se}) oder zwischen 270° und 360° (α_{Se}) liegt. Bei einem absteigenden Orbit fliegt der Satellit genau umgekehrt, von Nord nach Süd, und weist einen Azimutwinkel im Wertebereich zwischen 90° und 180° (α_{Se}) oder zwischen 180° und 270° (α_{Se}) auf. Je nach Größe des in den Metadaten des Satellitenbildes angegebenen Azimutwinkels ist die Flugrichtung des Satelliten bekannt.

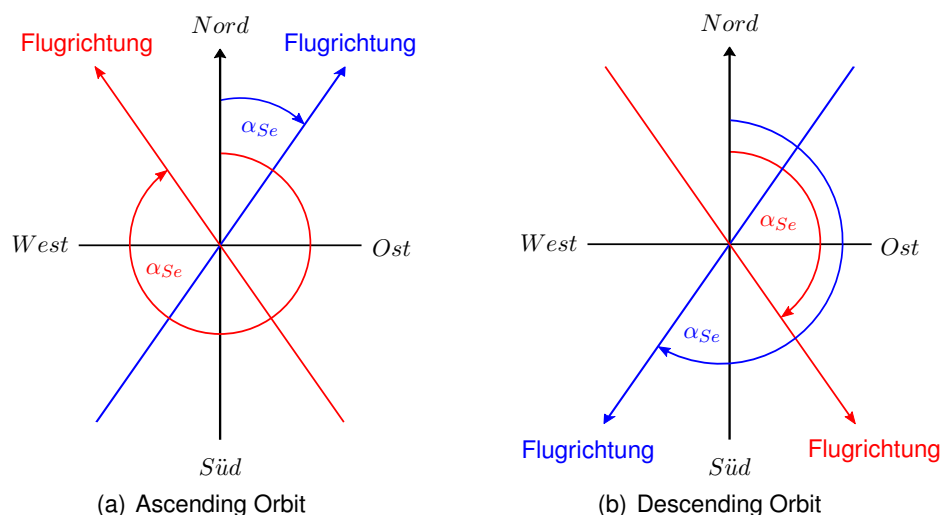


Abbildung 3.3 – Flugrichtung eines Satelliten bezüglich Nord

Im Falle einer Simulation auf Basis von Bilddaten einer SAR Aufnahme in GeoRaySAR kann die Information bezüglich der Flugrichtung genutzt werden, um die LoS, das heißt die Blickrichtung des Sensors, zu bestimmen, da diese während der Aufnahme senkrecht zur Flugrichtung (nach rechts) ausgerichtet ist. Dadurch ist es möglich, den Blickwinkel β_{SAR} über den Azimutwinkel des SAR Satelliten $\alpha_{Se,SAR}$ in Formel 3.5 zu ermitteln. Der Blickwinkel beschreibt im Allgemeinen den im Uhrzeigersinn verlaufenden Winkel zwischen der Blickrichtung (bzw. dem Sehstrahl) des Sensors

und der Nordachse in der horizontalen X - Y -Ebene des UTM Koordinatensystems.

$$\beta_{SAR} = \alpha_{Se,SAR} + 90^\circ \quad (3.5)$$

Im Gegensatz zum SAR Sensor kann die Flugrichtung des optischen Sensors nicht zur Bestimmung der LoS herangezogen werden. Grund hierfür ist, dass die Ausrichtung der Kamera eines optischen Satelliten nicht mit dessen Flugrichtung gekoppelt ist. Dadurch erfolgt die Aufnahme nicht durch die Orbitbewegung des Satelliten, sondern durch die Bewegung des Sensors. Somit ist der Zusammenhang zwischen dem Azimutwinkel und dem Blickwinkel aus Formel 3.5 für die Aufnahme eines optischen Sensors nicht mehr gegeben. Da der Blickwinkel jedoch essentiell für die Durchführung der Simulation auf Basis von hochauflösenden optischen Bilddaten ist, muss dieser unter Zuhilfenahme der vom Satellitenbetreiber gegebenen RPCs (vgl. Abschnitt 2.3) berechnet werden.

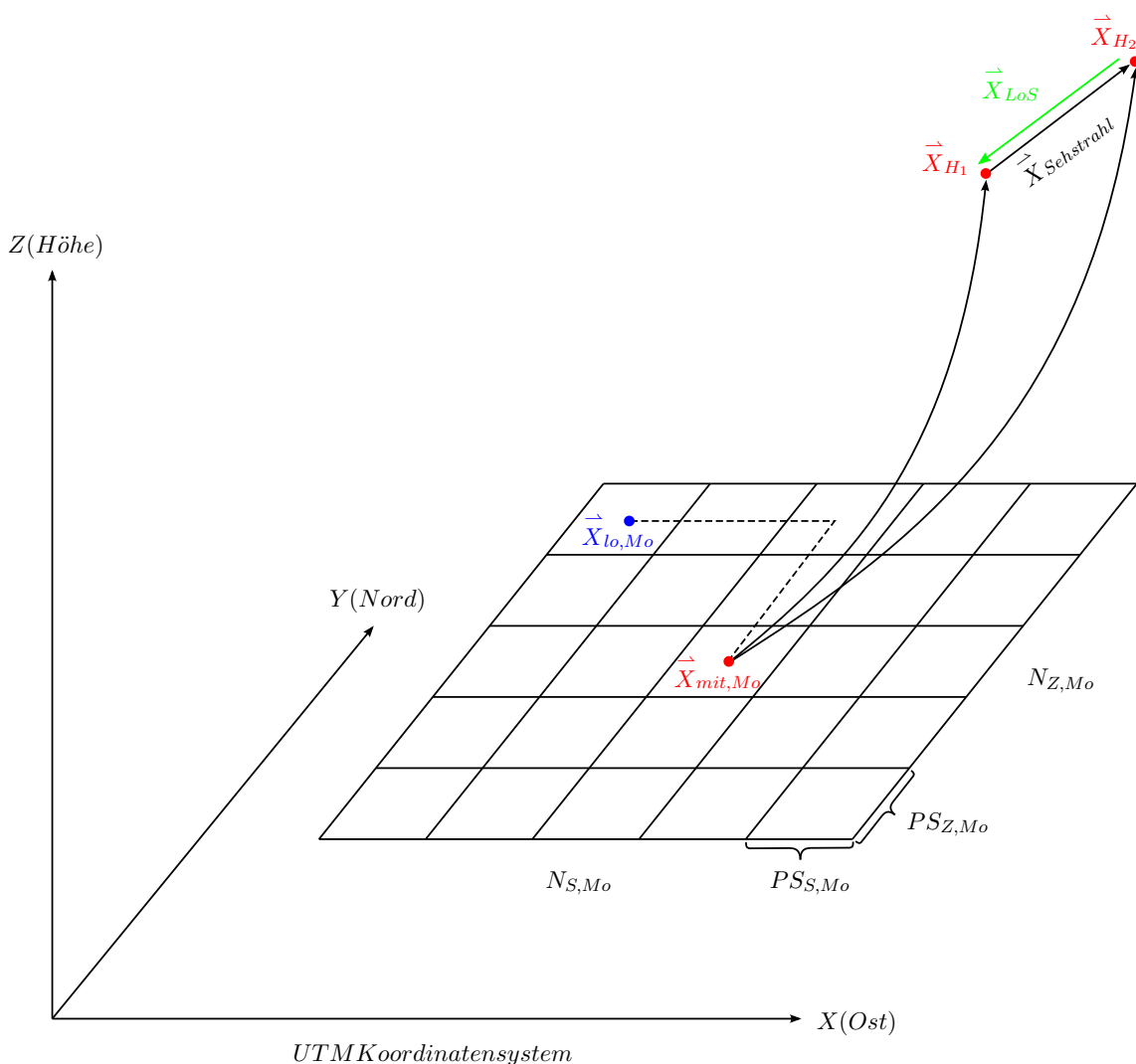


Abbildung 3.4 – Prinzip zur Ermittlung des Sensorsehstrahls während der Bilderfassung

Wie in Abb. 3.4 veranschaulicht, wird dafür in Formel 3.6 zunächst die UTM X - und Y -Koordinate des im Zentrum des 2,5D Bildes des Modells liegenden Pixels $\vec{X}_{mit,Mo} = (X_{mit,Mo}, Y_{mit,Mo})$ berechnet. Grund für die Wahl des mittleren Pixels ist die durch die Definition der UTM Zonen leichte Veränderung der UTM Koordinaten in Richtung Bildrand. Diese würde sich besonders bei sehr großen abgebildeten Szenen bemerkbar machen. Zur Ermittlung von $\vec{X}_{mit,Mo}$ wird von den ebenen UTM Koordinaten der Mitte des Pixels der linken oberen Ecke des Modells $\vec{X}_{lo,Mo} = (X_{lo,Mo}, Y_{lo,Mo})$ ausgegangen, die in den Metadaten des 2,5D Bildes gegeben sind. Über die Anzahl der Spalten $N_{S,Mo}$ und die Pixelauflösung entlang der Spalten $PS_{S,Mo}$ kann die Entfernung zwischen dem mittleren Pixel und dem Pixel der linken oberen Bildecke in X -Richtung und über die Anzahl der Zeilen $N_{Z,Mo}$ und die Pixelauflösung entlang der Zeilen $PS_{Z,Mo}$ die Entfernung in Y -Richtung bestimmt werden.

$$\begin{aligned} X_{mit,Mo} &= X_{lo,Mo} + \left(\frac{N_{S,Mo} - 1}{2} \right) \cdot PS_{S,Mo} & \text{m} \\ Y_{mit,Mo} &= Y_{lo,Mo} - \left(\frac{N_{Z,Mo} - 1}{2} \right) \cdot PS_{Z,Mo} & \text{m} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Nach Laden der RPCs kann mit dem damit erstellten geometrischen Kameramodell der soeben bestimmte Mittelpunkt des Modells über die Funktion *image2geo* in eine beliebig wählbare Höhe H_1 (m) in den Raum projiziert werden. Zuvor muss jedoch eine Transformation in geographische Koordinaten durchgeführt werden, da das RPC Kameramodell im geographischen Koordinatensystem arbeitet und geographische Koordinaten als Input erwartet (vgl. Abb. 2.4). Bei der mittels *image2geo* durchgeführten Projektion vom Bild- in den Objektraum werden die 2D Bildkoordinaten mit der gewählten Höhe H_1 geschnitten, woraus 3D Objektkoordinaten resultieren. Daraufhin kann, wiederum unter Zuhilfenahme der RPCs, der generierte geographische 3D Punkt über die Funktion *geo2image* in die 2D Bildebene projiziert werden. Wird dieser 2D Bildpunkt auf eine von H_1 (m) unterschiedlichen Höhe H_2 (m) durch das RPC Kameramodell in den Raum projiziert (wiederum über Funktion *image2geo*), liegen zwei verschiedene 3D Raumpunkte in geographischen Koordinaten vor, mit deren Hilfe der Sehstrahl des Sensors $\vec{X}_{Sehstrahl}$ während der Aufnahme der Szene bestimmt werden kann. Da die Berechnungen bezüglich der Simulation in GeoRayOpt jedoch nicht im geographischen, sondern im UTM Koordinatensystem stattfinden, müssen die beiden Vektoren anhand der gegebenen UTM Zone der Abbildung zunächst noch in das UTM Koordinatensystem zurücktransformiert werden. Werden diese beiden dreidimensionalen und in UTM Koordinaten vorliegenden Vektoren \vec{X}_{H_1} und \vec{X}_{H_2} voneinander abgezogen (vgl. Formel 3.7), lässt sich der Vektor des Sehstrahls des optischen Sensors $\vec{X}_{Sehstrahl}$ bestimmen (vgl. Abb. 3.4). Die Blickrichtung des optischen Sensors auf die aufzunehmende Szene ist mit dem in Abb. 3.4 in Grün eingezeichneten Vektor \vec{X}_{LoS} gegeben.

$$\vec{X}_{Sehstrahl} = \vec{X}_{H_2} - \vec{X}_{H_1} \quad \text{m} \quad (3.7)$$

Da der Blickwinkel β in der horizontalen UTM X - Y -Ebene definiert ist, wird der Sehstrahl $\vec{X}_{Sehstrahl}$ auf diese Ebene projiziert. Dadurch bleibt die dritte Dimension des Sehstrahlvektors für die Berechnung des Blickwinkels unberücksichtigt. Wie in Abb. 3.5(a) dargestellt, kann der Blickwinkel β folglich aus den Komponenten $X_{Sehstrahl}$ und $Y_{Sehstrahl}$ des in Formel 3.7 ermittelten Sehstrahls $\vec{X}_{Sehstrahl}$ in Bezug auf die Nordachse des UTM Koordinatensystems bestimmt werden (vgl. Formel 3.8).

$$\tan(\beta) = \frac{X_{Sehstrahl}}{Y_{Sehstrahl}} \Rightarrow \beta = \arctan\left(\frac{X_{Sehstrahl}}{Y_{Sehstrahl}}\right) \quad (3.8)$$

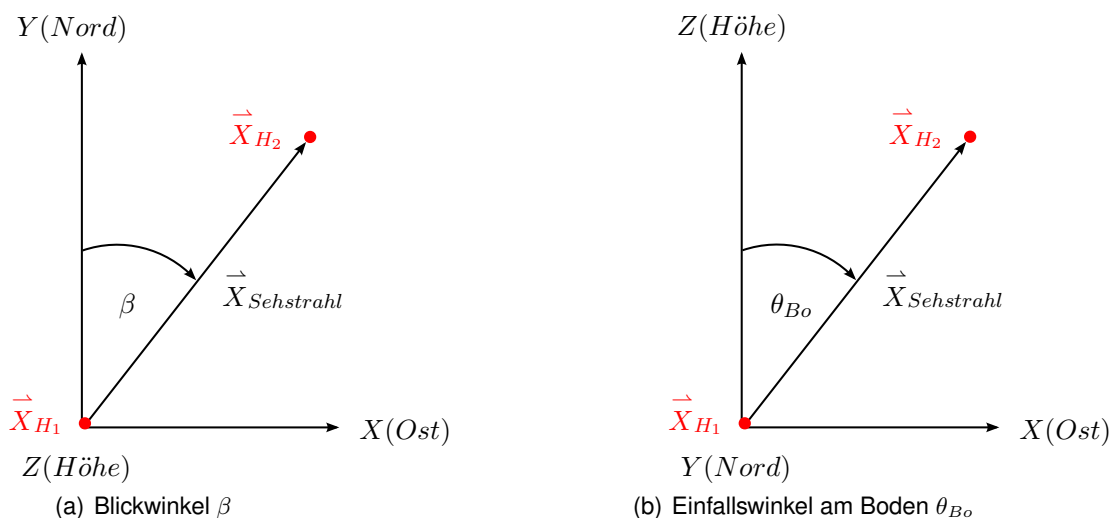


Abbildung 3.5 – Winkelberechnung im UTM Koordinatensystem

Einfallswinkel am Boden θ_{Bo}

Der in den Bildmetadaten enthaltene Einfallswinkel wird, je nach Satellitenbetreiber, entweder am Sensor (θ_{Se}) oder am Boden (θ_{Bo}) angegeben. Da diese beiden Winkel in verschiedenen Koordinatensystemen definiert sind, sind sie nicht äquivalent. Wie in Abb. 3.6 gezeigt, beschreibt der Einfallswinkel am Sensor θ_{Se} den Winkel zwischen dem Sehstrahl und der senkrecht zur Bildebene des Sensors gerichteten Nadirrichtung. Der Einfallswinkel am Boden θ_{Bo} hingegen stellt den Winkel zwischen dem Sehstrahl und der Normalen zur Erdoberfläche bzw. zum aufzunehmenden Objekt dar. Da die Erde aufgrund der Kugelgestalt gekrümmt ist und der Satellit kreisförmig auf seinem Orbit um die Erde kreist, ist die Bildebene nur in seltenen Fällen exakt parallel zur Erdoberfläche bzw. zur Oberfläche des darauf befindlichen Objekts. Die Nadirrichtung der Bildebene und die Normale zur Erdoberfläche sind nicht parallel, was den Unterschied zwischen den beiden Einfallswinkeln erklärt.

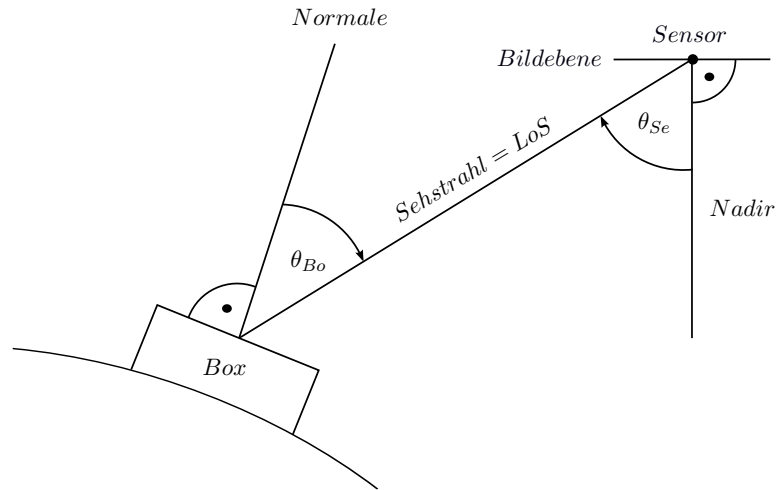


Abbildung 3.6 – Einfallswinkel am Sensor θ_{Se} und Einfallswinkel am Boden θ_{Bo}

Für die Berechnungen bezüglich der Simulation wird der Einfallswinkel am Boden θ_{Bo} benötigt. Falls in den Metadaten des optischen Satellitenbildes jedoch der Einfallswinkel am Sensor θ_{Se} gegeben ist, muss θ_{Bo} ermittelt werden. Wie in Abb. 3.5(b) zu sehen ist, können dafür der in Formel 3.7 bestimmte Sehstrahl des Sensors $\vec{X}_{Sehstrahl}$ im Raum und der Vektor der Höhenachse des UTM Koordinatensystems $\vec{Z} = (0, 0, 1)$ verwendet werden. Über das Skalarprodukt der beiden Vektoren wird der gewünschte Einfallswinkel berechnet (vgl. Formel 3.9).

$$\cos(\theta_{Bo}) = \frac{\vec{X}_{Sehstrahl} \circ \vec{Z}}{\|\vec{X}_{Sehstrahl}\| \circ \|\vec{Z}\|} \Rightarrow \theta_{Bo} = \arccos \left(\frac{\vec{X}_{Sehstrahl} \circ \vec{Z}}{\|\vec{X}_{Sehstrahl}\| \circ \|\vec{Z}\|} \right) \quad (3.9)$$

Da alle Definitionen bezüglich der Simulation in einem lokalen Koordinatensystem (POV Koordinatensystem) mit einer gleich bleibenden lokal definierten Kameraposition vorgenommen werden, dürfen die beiden Einfallswinkel θ_{Se} und θ_{Bo} bei der POV-Ray Modellierung als gleich betrachtet werden. Der Übersichtlichkeit halber wird daher der in Formel 3.9 ermittelte Einfallswinkel, der für die gesamte Szene als konstant angenommen wird, im Folgenden mit $\theta = \theta_{Se} = \theta_{Bo}$ bezeichnet.

Die gewählte Methode zur Berechnung des Blickwinkels β und des Einfallswinkels θ ist in die vollautomatische Prozessierungskette zur Durchführung von Simulationen mittels GeoRayOpt eingebaut. Daher kann diese Art der Ermittlung nur für Modelle durchgeführt werden, die auf UTM Koordinaten basieren.

3.2.3 Ergänzung der .pov Datei um Sensor-, Licht- und Modellparameter

Nach Erstellung der für POV-Ray notwendigen .pov Datei und Bestimmung aller für die Berechnungen bezüglich der Simulation notwendigen Parameter in Abschnitt 3.2.1 und 3.2.2 wird die .pov Datei am Anfang und am Ende, das heißt vor und nach den aufgelisteten Pixelhöhenwerten und Kombinationen der triangulierten Dreiecke, um Sensor-, Licht- und Modellinformationen ergänzt. Die Festlegungen beziehen sich dabei auf ein lokales Koordinatensystem, das im Folgenden als

POV Koordinatensystem bezeichnet wird. Die Definition der drei Achsen des POV Koordinatensystems $x(rechts)$, $y(hoch)$ und $z(tief)$ ist zusammen mit der Achsendefinition des UTM Koordinatensystems ($X(Ost)$, $Y(Nord)$ und $Z(Höhe)$) Abb. 3.14 zu entnehmen.

Sensorparameter

Die Informationen bezüglich des aufnehmenden Sensors werden an den Anfang der .pov Datei gesetzt. Hierbei wird eine orthographische Kamera gewählt, die ihre Strahlen gleichgerichtet nach dem Prinzip der Parallelprojektion aussendet. Im Gegensatz zu einer perspektivischen Kamera ist es hierbei gleichgültig, wie weit weg sich der Sensor von der aufzunehmenden Szene befindet, da keine perspektivischen Verkürzungen bzw. Verzerrungen auftreten. Außerdem wird die Blickrichtung des Sensors auf das Zentrum der Modellbox $\vec{X}_{Ze} = (x_{Ze}, y_{Ze}, z_{Ze})$ festgesetzt (vgl. Abb. 3.16). Die Koordinaten des Zentrums im POV Koordinatensystem können über Formel 3.10 aus den Angaben zur Modellbox berechnet werden.

$$\begin{aligned} x_{Ze} &= \frac{L_{Box} - PS_{S,Mo}}{2} & \text{m} \\ y_{Ze} &= H_{Box,mit} & \text{m} \\ z_{Ze} &= \frac{B_{Box} - PS_{Z,Mo}}{2} & \text{m} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Des Weiteren muss die Sensorposition $\vec{X}_{Se,POV} = (x_{Se,POV}, y_{Se,POV}, z_{Se,POV})$ in der .pov Datei angegeben werden (vgl. Formel 3.11).

$$\begin{aligned} x_{Se,POV} &= x_{Ze} & \text{m} \\ y_{Se,POV} &= y_{Ze} + H_{Se} = y_{Ze} + \frac{D}{\tan(\theta)} & \text{m} \\ z_{Se,POV} &= z_{Ze} + D & \text{m} \end{aligned} \quad (3.11)$$

In diesem Fall wird der Sensor mit der Höhe $H_{Se} = \frac{D}{\tan(\theta)}$ über dem Mittelpunkt der Modellbox um den Wert D in die positive z -Achse des POV Koordinatensystems gesetzt, wodurch er nach unten, das heißt in Richtung der negativen z -Achse, auf das Modell blickt (vgl. Abb. 3.16). Unter Annahme einer orthographischen Kamera und einer flachen Erdoberfläche kann der Parameter D beliebig gewählt werden, da, wie in Abb. 3.7 gezeigt wird, mit größer werdendem horizontalen Abstand D zwischen dem Zentrum der Box und der Position des Sensors ($D_1 < D_2 < D_3 < D_4$) auch die Höhe des Sensors H_{Se} über dem Boxzentrum größer wird ($H_{Se,1} < H_{Se,2} < H_{Se,3} < H_{Se,4}$). Das Modell kann beliebig weit zum Sensor hin oder vom Sensor weg verschoben werden, ohne dass sich der Einfallswinkel ($\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \theta_4$) und die Bildgröße verändern.

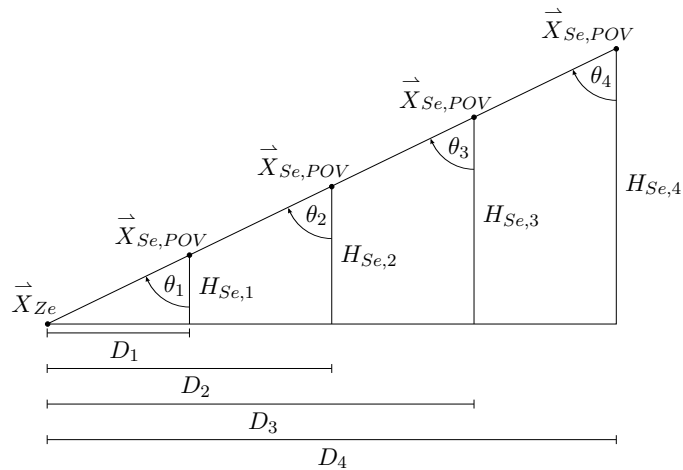


Abbildung 3.7 – Höhenbestimmung des Sensors über dem Zentrum der Modellbox

Die Definition der Sensorposition im POV Koordinatensystem ist variabel, da es sich um ein lokales Koordinatensystem handelt. Die Signalquelle könnte alternativ beispielsweise auch mit der Höhe $H_{Se} = \frac{D}{\tan(\theta)}$ über dem Mittelpunkt der Modellbox um den Wert D in die negative z -Achse gesetzt werden und von unten, das heißt in Richtung der positiven z -Achse, auf die Box schauen (vgl. Formel 3.12). Für diese Alternativlösung müssten lediglich an entsprechenden Stellen die Definitionen in der .pov Datei und bei der späteren Geokodierung in Abschnitt 3.2.5 auf die definierte Sensorposition in Formel 3.12 angepasst werden. Im Folgenden wird jedoch mit der Sensorposition aus Formel 3.11 weitergearbeitet.

$$\begin{aligned}
 x_{Se,POV} &= x_{Ze} & \text{m} \\
 y_{Se,POV} &= y_{Ze} + H_{Se} = y_{Ze} + \frac{D}{\tan(\theta)} & \text{m} \\
 z_{Se,POV} &= z_{Ze} - D & \text{m}
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

Außerdem benötigt der Ray Tracer POV-Ray die Größe des zu simulierenden Bildes als Eingabeparameter, so dass die .pov Datei auch um diese Information ergänzt werden muss. Dafür wird berechnet, wie groß das zu simulierende Bild sein muss, um das gesamte Modell darin abzubilden.

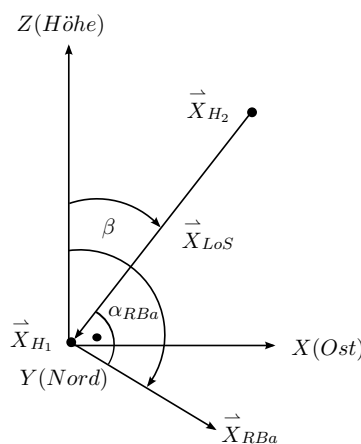


Abbildung 3.8 – Orientierung der Rechtswert-Bildachse \vec{X}_{RBa} in der UTM X - Y -Ebene

Zur Ermittlung der Breite des zu simulierenden Bildes B_{Simu} muss zunächst die Orientierung der Rechtswert-Bildachse (\vec{X}_{RBa} in Abb. 3.8) in der UTM X - Y -Ebene mit Bezug auf die Nordrichtung des UTM Koordinatensystems bestimmt werden. Da die Rechtswert-Bildachse orthogonal (nach links) zur Blickrichtung des Sensors \vec{X}_{LoS} verläuft, kann der in Abschnitt 3.2.2 ermittelte Blickwinkel β zur Bestimmung der Orientierung der Bildachse bezüglich Nord α_{RBa} herangezogen werden (vgl. Abb. 3.8 und Formel 3.13).

$$\alpha_{RBa} = \beta + 90^\circ \quad (3.13)$$

Folglich kann mit Hilfe des in Formel 3.13 bestimmten Winkels und der in Abb. 3.9 graphischen Veranschaulichung die gesuchte Breite B_{Simu} ermittelt werden. Wie in Formel 3.14 zu erkennen ist, setzt sich diese aus zwei Anteilen zusammen. Einerseits wird die in Abb. 3.9 rot markierte Komponente, die dem ersten Teil in Formel 3.14 entspricht, durch die Länge der Modellbox L_{Box} bestimmt. Andererseits nimmt die Modellbreite B_{Box} Einfluss auf die Breite des zu simulierenden Bildes. Diese Komponente ist in Abb. 3.9 blau gekennzeichnet und entspricht dem zweiten Teil in Formel 3.14. Es ergibt sich aus den beiden Teilen die auf die Rechtswert-Bildachse projizierte Breite, die das Modell von der Sensorposition aus im zu simulierenden Bild einnimmt.

$$B_{Simu} = L_{Box} \cdot \sin(\alpha_{RBa}) + B_{Box} \cdot \cos(\alpha_{RBa}) \quad \text{m} \quad (3.14)$$

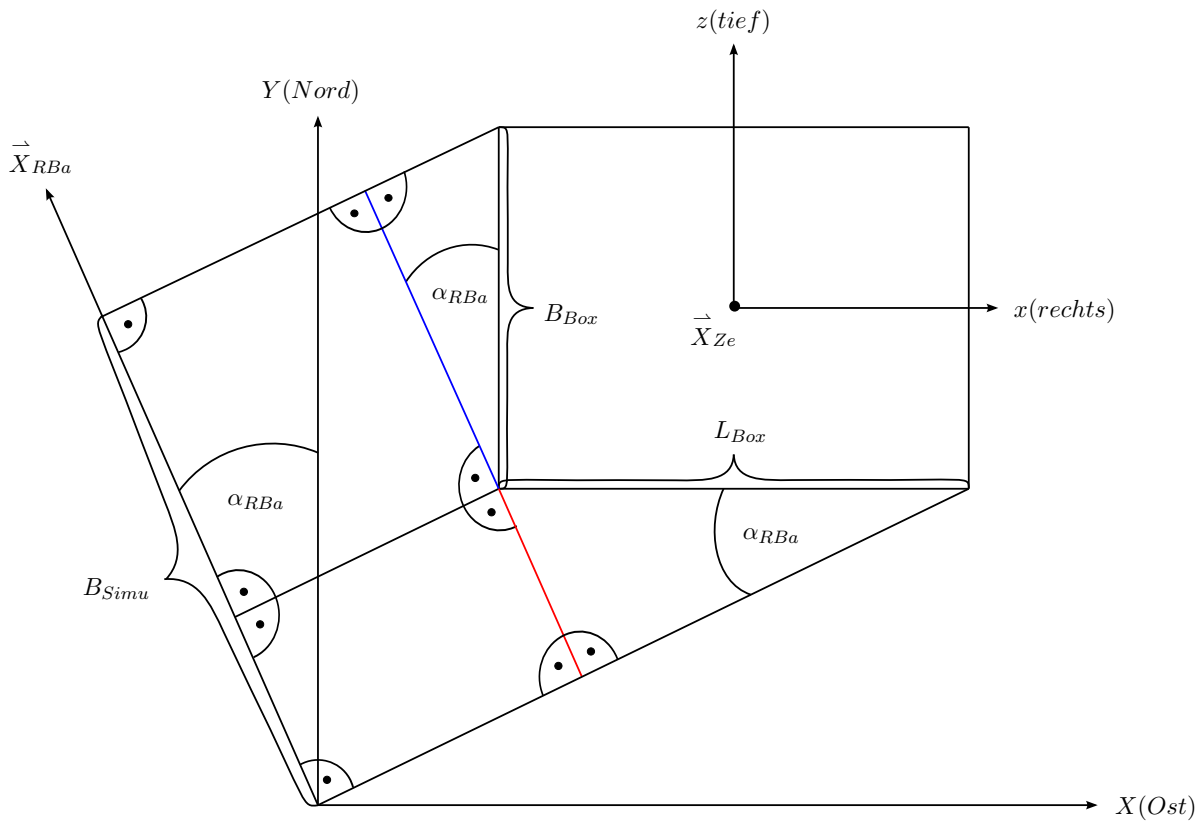


Abbildung 3.9 – Berechnung der Breite des zu simulierenden Bildes B_{Simu}

Neben der Breite des zu simulierenden Bildes B_{Simu} muss auch dessen Höhe H_{Simu} für das Ray Tracing bekannt sein. Diese wird auf die Hochwert-Bildachse projiziert. Wie Abb. 3.10 zu entnehmen ist, weist die Hochwert-Bildachse \vec{X}_{HBa} sowohl zur Blickrichtung des Sensors \vec{X}_{LoS} als auch zur Rechtswert-Bildachse \vec{X}_{RBa} eine Orthogonalität auf.

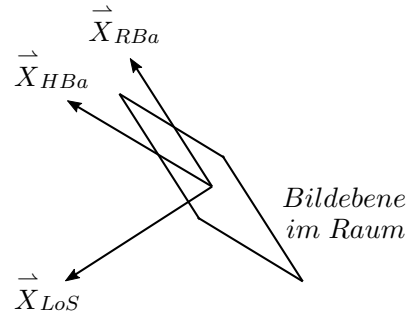


Abbildung 3.10 – Raumbildebene mit Rechtswert-Bildachse \vec{X}_{RBa} und Hochwert-Bildachse \vec{X}_{HBa}

Zur Bestimmung des Ausmaßes der Modellbox auf die Höhe des zu simulierenden Bildes wird, wie in Abb. 3.11 ersichtlich, jeweils die doppelte Distanz von Ecke E_1 bis E_4 zum Modellzentrum \vec{X}_{Ze} berechnet, um die vier blau, rot, magenta und grün dargestellten Diagonalen der Modellbox zu errechnen. Die Höhe des simulierten Bildes wird anschließend durch jene Diagonale festgelegt, welche die Verbindungslinie zwischen der unteren Ecke, die sich am nächsten am Sensor befindet, und der oberen Ecke, die am weitesten vom Sensor entfernt liegt, darstellt. Die Strecke, die diese Diagonale in der Hochwert-Bildachse einnimmt, gibt die Höhe der Box im Sichtfeld des optischen Sensors und damit die Höhe des zu simulierenden Bildes H_{Simu} (m) wieder. Im vorliegenden Beispiel ist dies die rot gekennzeichnete Diagonale der Modellbox.

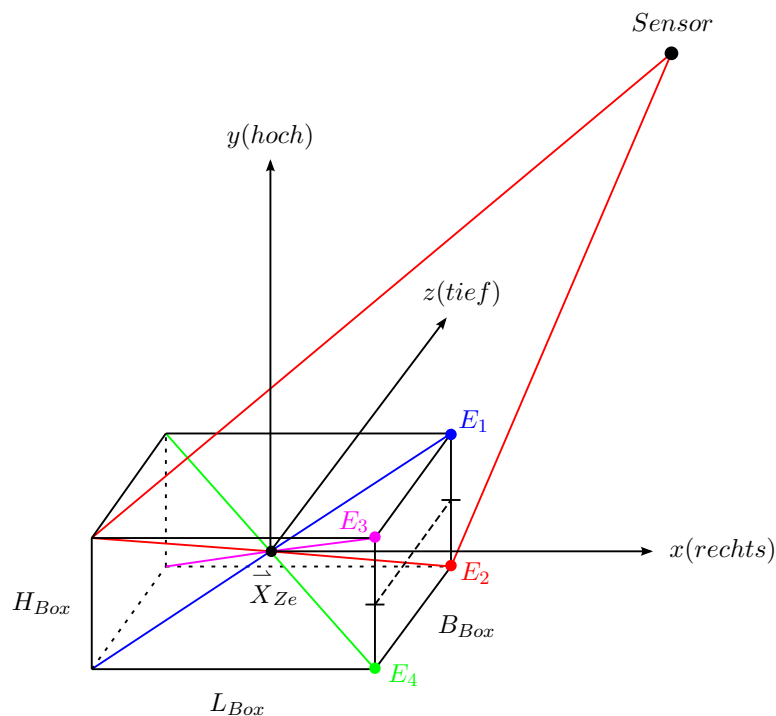


Abbildung 3.11 – Berechnung der Höhe des zu simulierenden Bildes H_{Simu}

Da POV-Ray die Größe des zu simulierenden Bildes nicht als Längenmaß, sondern in Anzahl von Pixeln erwartet, muss berechnet werden, wie viele Pixel in der soeben bestimmten Breite B_{Simu} und Höhe H_{Simu} liegen. Dafür ist in Formel 3.15 zunächst eine Bestimmung der Pixelauflösung entlang der Zeilen in der Bildebene im Raum ($PS_{Z,Simu}$) erforderlich, da diese durch den schräg blickenden Sensor ($\theta \neq 0^\circ$) nicht der Bodenpixelauflösung entlang der Zeilen des optischen Satellitenbildes $PS_{Z,Opt}$ entspricht. Wie in Abb. 3.12 veranschaulicht, findet die Berechnung der Zeilen-Pixelauflösung in der Raumbildebene über den in Abschnitt 3.2.2 errechneten Einfallswinkel θ statt. Bei der Pixelgröße entlang der Spalten ändert sich zwischen der Bildebene im Raum und jener am Boden nichts ($PS_{S,Simu} = PS_{S,Opt}$), da die auf den Boden projizierte Rechtswert-Bildachse des Bildes im Raum der des Bildes am Boden entspricht.

$$\cos(\theta) = \frac{PS_{Z,Simu}}{PS_{Z,Opt}} \implies PS_{Z,Simu} = \cos(\theta) \cdot PS_{Z,Opt} \quad \text{m} \quad (3.15)$$

$$PS_{S,Simu} = PS_{S,Opt} \quad \text{m}$$

Würde der Sensor die Szene in Nadirrichtung aufnehmen, ergäbe sich ein Einfallswinkel von $\theta = 0^\circ$. Dadurch würde die Umrechnung in Formel 3.15 entfallen und die gegebene Pixelgröße in der Bildebene am Boden $PS_{Z,Opt}$ könnte zur Bestimmung der Zeilenanzahl des zu simulierenden Bildes in Formel 3.16 verwendet werden.

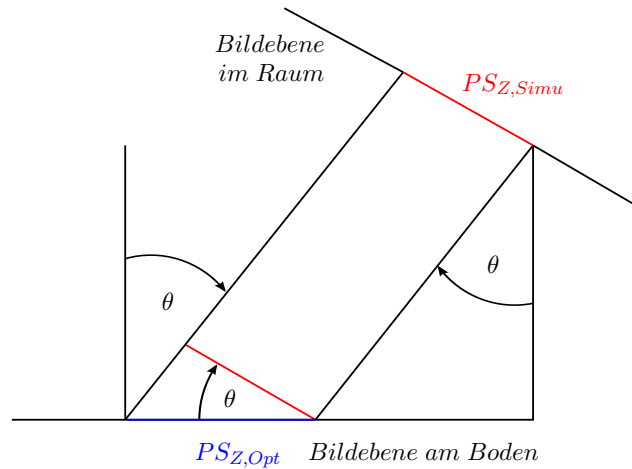


Abbildung 3.12 – Berechnung der Pixelauflösung des zu simulierenden Bildes

Durch die Umrechnung der Pixelgröße wird am Inhalt des Bildes nichts verändert, es kommt lediglich zu einer Anpassung der Abtastung des Bildes. Damit wird, je nach Größe von θ und $PS_{Z,Opt}$, eine stärkere oder weniger starke Stauchung oder Ausdehnung des Raumbildes vorgenommen, um denselben Bildinhalt wie das Bild am Boden darzustellen. Nur über solch eine Skalierung kann bestimmt werden, wie viele Pixel sich im zu simulierenden Bild befinden, um dem Ray Tracer eine Schrittweite zu übergeben, mit der er das zu simulierende Bild abtasten soll. Außerdem wird sichergestellt, dass beim Ray Tracing für jedes Bodenpixel ein Strahl in den Raum geschickt wird und dadurch für jedes Pixel ein Abtastwert vorliegt.

In Formel 3.16 ergibt sich die Anzahl an Zeilen $N_{Z,Simu}$ und Spalten $N_{S,Simu}$ des in POV-Ray zu simulierenden Bildes. Hierbei ist auf eine Rundung zu achten, da ein Bild eine volle Anzahl an Pixeln aufweist.

$$\begin{aligned} N_{Z,Simu} &= \frac{H_{Simu}}{PS_{Z,Simu}} & \text{px} \\ N_{S,Simu} &= \frac{B_{Simu}}{PS_{S,Simu}} & \text{px} \end{aligned} \quad (3.16)$$

Parameter der Lichtquelle

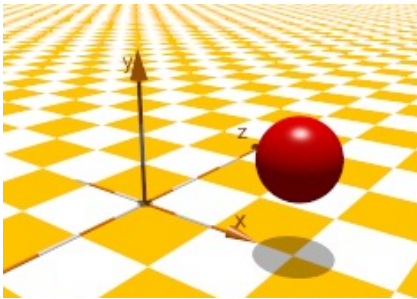


Abbildung 3.13 – Punktförmige Lichtquelle mit parallelen Strahlen im POV Koordinatensystem [Lohmüller 2010]

Im Anschluss an die Sensordefinitionen werden die notwendigen Parameter in Bezug auf den Beleuchtungskörper am Anfang der .pov Datei festgelegt. Für die Simulationen in dieser Arbeit wird eine punktförmige Lichtquelle verwendet, die parallele Strahlen aussendet, da diese dem Sonnenlicht in der Realität am nächsten kommt (vgl. Abb. 3.13). Außerdem wird durch die Wahl der drei Spektralfarben **R**ot, **G**rün und **B**lau (RGB) = (1, 1, 1) festgelegt, dass das Licht in POV-Ray in der Farbe weiß ausgesendet wird. Die Sonnenstrahlen werden, genauso wie die Blickrichtung des Sensors, auf das Boxzentrum des Modells \vec{X}_{Ze}

gerichtet. Der Standort der Sonne kann unterschiedlich definiert werden. Wie in Abb. 3.14 dargestellt, kann die Sonnenposition $\vec{X}_{So,POV} = (x_{So,POV}, y_{So,POV}, z_{So,POV})$ zum einen mit der in Formel 3.11 definierten Position des aufnehmenden Sensors $\vec{X}_{Se,POV}$ gleichgesetzt werden. Hierbei wird nach der Simulation in POV-Ray im simulierten Bild kein Schatten vorhanden sein, da der Sensor genau den Bereich des aufzunehmenden Objekts sieht, der auch durch die Lichtquelle beleuchtet ist. Zum anderen kann die Sonne mittels Formel 3.18 auch an der Position definiert werden, an der sie sich in Wirklichkeit während der Aufnahme des Objekts befand ($\vec{X}_{So,POV} = \vec{X}_{So,wahr}$ in Abb. 3.14). Hierbei wird für den horizontalen Abstand zwischen dem Zentrum der Modellbox und der benutzerdefinierten Position der Lichtquelle in POV-Ray derselbe Wert D gewählt wie schon in Formel 3.11. Außerdem trägt der in den Bildmetadaten über den Azimutwinkel α_{So} und Elevationswinkel ε_{So} gegebene Ort der Sonne zur Festlegung der wahren Lichtposition im POV Koordinatensystem bei. Wie dabei α_{So} und ε_{So} im Weltkoordinatensystem definiert sind, wird in Abb. 3.15(a) graphisch gezeigt. Im Gegensatz zu ε_{So} kann α_{So} jedoch nicht direkt zur Ermittlung der wahren Sonnenposition in POV-Ray verwendet werden, sondern muss um den Rotationswinkel ρ_{Mo} des Modells, auf den nachfolgend bei der Beschreibung der Modellparameter näher eingegangen wird, angepasst werden (vgl. Formel 3.17). Durch die Addition der Zentrumskoordinaten der Box in Formel 3.18 wird die Sonnenposition in Bezug auf die Modellbox definiert.

$$\alpha_{2So} = \alpha_{So} + \rho_{Mo} \quad \circ \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned}
 x_{So} &= x_{Ze} + \sin(\alpha_{2So}) \cdot D & \text{m} \\
 y_{So} &= y_{Ze} + H_{So} = y_{Ze} + \tan(\varepsilon_{So}) \cdot D & \text{m} \\
 z_{So} &= z_{Ze} + \cos(\alpha_{2So}) \cdot D & \text{m}
 \end{aligned}
 \tag{3.18}$$

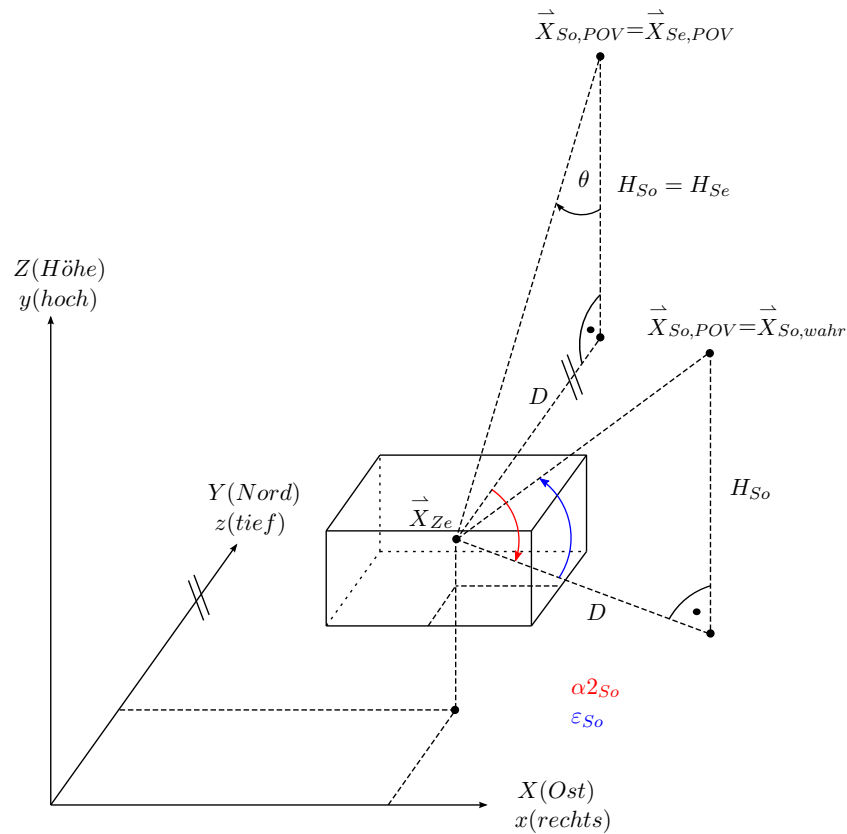


Abbildung 3.14 – Zwei verschiedene Definitionen der Sonnenposition im POV Koordinatensystem

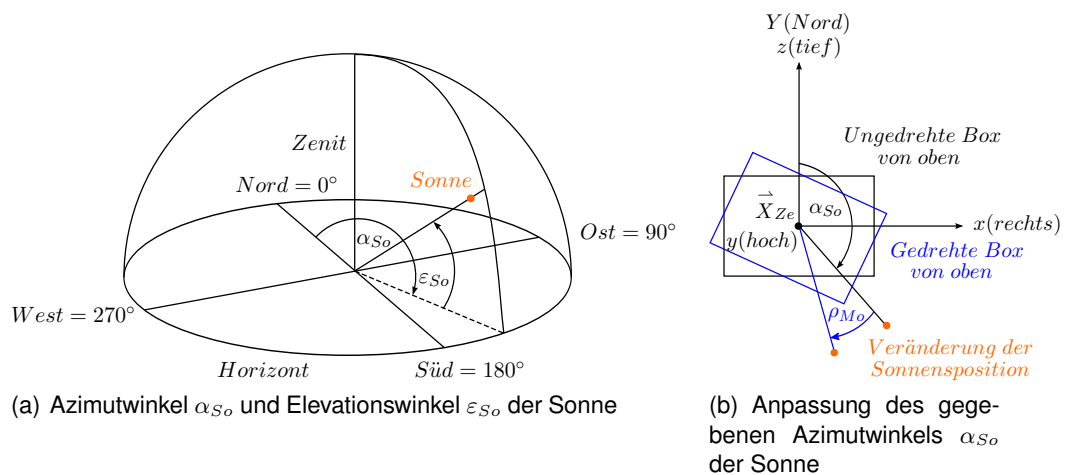


Abbildung 3.15 – Berechnung der Sonnenposition zum Zeitpunkt der Satellitenbilddaufnahme

Wird die Lichtquelle nicht der Sensorposition gleichgesetzt, sondern an ihrem realen Standort festgelegt, werden Schattenbereiche im simulierten Bild zu erkennen sein. Grund hierfür ist, dass der Sensor nun auch Bereiche sieht, die durch den Schattenwurf der Sonne verdeckt sind.

Modellparameter

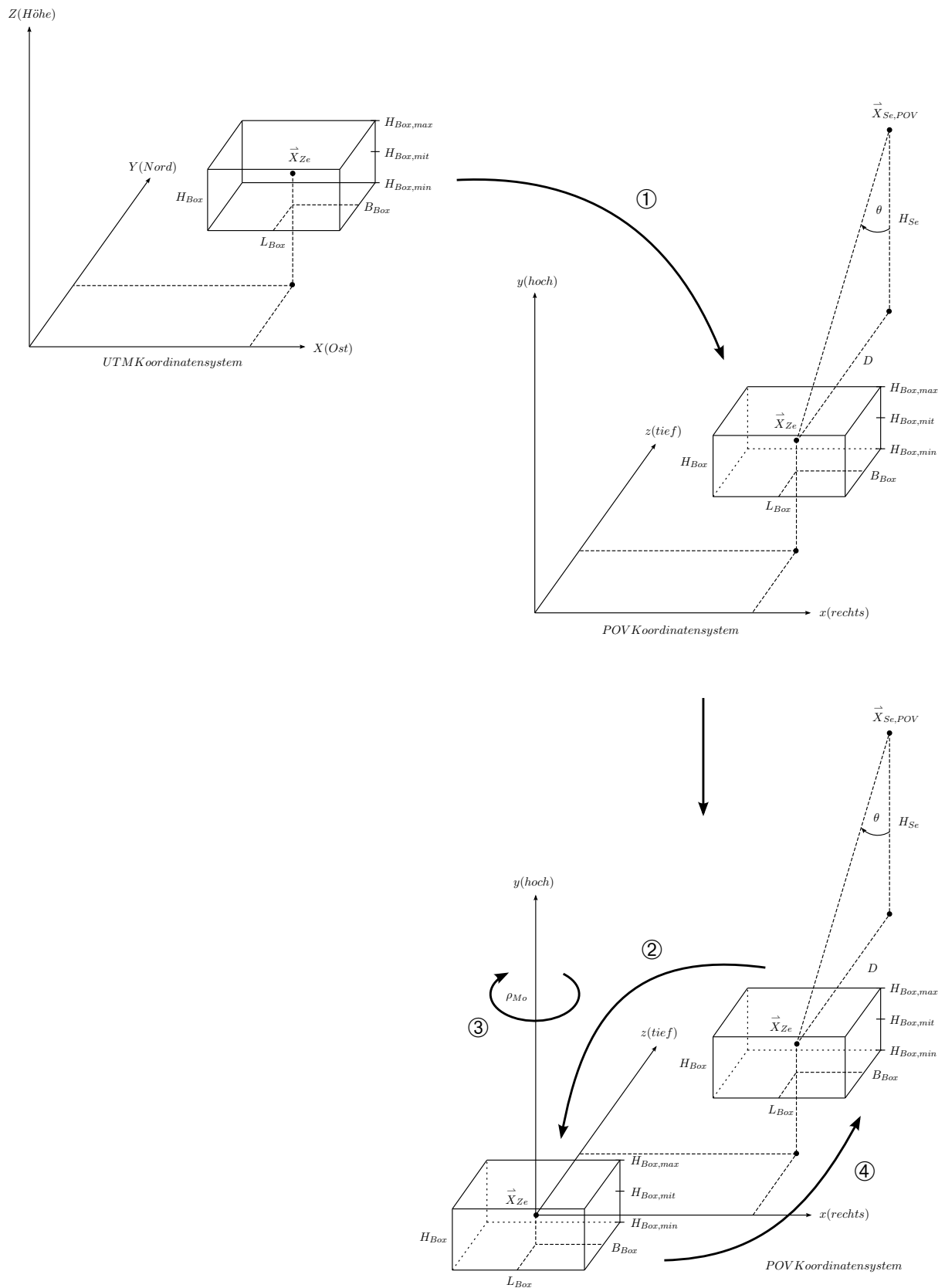


Abbildung 3.16 – Schritte für die Einstellung der Aufnahmegeometrie in POV-Ray

Zur Vervollständigung der .pov Datei werden nun noch die Modellinformationen an das Ende der Datei angefügt.

Wie zu Beginn des Abschnittes bereits erwähnt, arbeitet der Ray Tracer POV-Ray in einem lokalen Koordinatensystem. Abb. 3.16 zeigt, dass dessen Achsendefinition von der des UTM Koordinatensystems abweicht. Nachdem das nach Norden ausgerichtete Modell ursprünglich im UTM Koordinatensystem gegeben ist, wird dieses in einem ersten Schritt ① mit selbiger Orientierung ins POV Koordinatensystem übernommen. Bis zu diesem Zeitpunkt ist die Ausrichtung des Modells noch dieselbe wie im UTM Koordinatensystem, jedoch ist der Bezug zu Absolutkoordinaten nicht mehr gegeben.

Da die in Abb. 3.16 eingezeichnete Sensorposition im lokalen POV Koordinatensystem an eine frei wählbare Stelle gesetzt werden kann, welche in dieser Masterarbeit der Position in Formel 3.11 entspricht, stimmt die Perspektive, die der Sensor während der Bilderfassung auf das Modell hatte, noch nicht mit der im POV Koordinatensystem überein. Zur Herstellung der richtigen Aufnahmegeometrie können zwei verschiedene Wege verfolgt werden. Einerseits ist es möglich, die Orientierung der Modellbox, so wie sie im POV Koordinatensystem gelagert ist, beizubehalten und den Sensor von seiner in Formel 3.11 definierten Position als Ausgangspunkt so um die y -Achse des POV Systems zu drehen, dass die Perspektive in Bezug auf das Modell der wahren Betrachtung entspricht. Andererseits kann jedoch auch die Sensorposition im POV Koordinatensystem an der in Formel 3.11 festgelegten Stelle belassen werden und das Modell um dessen Zentrum so rotiert werden, dass die Perspektive des Sensors auf die Szene stimmt. Der zuletzt erwähnte Weg wird gewählt. Da Rotationen von Objekten um deren Mittelpunkt in POV-Ray im Ursprung des POV Koordinatensystems erfolgen müssen, muss das Zentrum des Modells zunächst um $-\vec{X}_{Ze} = -(x_{Ze}, y_{Ze}, z_{Ze})$ in den Ursprung verschoben werden (Schritt ② in Abb. 3.16), wodurch es aus dem Blickfeld der Kamera verschwindet [Lohmüller 2006a]. Nach dortiger Drehung des Modells anhand des in Formel 3.19 angegebenen Rotationswinkels ρ_{Mo} um die y -Achse (Schritt ③ in Abb. 3.16) wird die rotierte Box im Anschluss über $+\vec{X}_{Ze} = +(x_{Ze}, y_{Ze}, z_{Ze})$ zurück an die ursprüngliche Stelle im POV Koordinatensystem gesetzt (Schritt ④ in Abb. 3.16) [Lohmüller 2006a]. Nun befindet sie sich erneut im Blickfeld der Kamera und der Sensor weist in Bezug auf das Modell die richtige Perspektive auf. Die Modellbox liegt jedoch ohne jegliche Orientierung im Raum.

$$\rho_{Mo} = -\beta \quad \circ \quad (3.19)$$

Der Rotationswinkel ρ_{Mo} wird wie folgt ermittelt:

1. Zunächst wird die Information bezüglich der im POV Koordinatensystem festgelegten Blickrichtung des Sensors auf die Modellbox benötigt. Diese geht aus den Definitionen der Sensorparameter zu Beginn dieses Abschnittes aus Formel 3.10 und 3.11 hervor. Zur Veranschaulichung ist die benutzerdefinierte Blickrichtung des Sensors auf das Modell im POV Koordinatensystem in Abb. 3.17 als roter Pfeil eingezeichnet.
2. Daraufhin wird der in Formel 3.8 bestimmte Blickwinkel β herangezogen. Ist dieser negativ, verläuft er von der Nordachse aus entgegen dem Uhrzeigersinn. Ist β hingegen positiv, weist

dieser einen Winkel auf, der bezüglich Nord im Uhrzeigersinn definiert ist. In Abb. 3.17 ist beispielhaft ein positiver Blickwinkel grün eingezeichnet, wodurch sich die blau markierte wahre Blickrichtung des Sensors gegenüber dem Modell während der Aufnahme ergibt.

3. Da die oben beschriebene Methode der Modelldrehung anstelle der Sensorpositionsveränderung zur Einstellung der richtigen Sensorperspektive auf das Modell gewählt wird, muss eine Drehung im Zentrum der Modellbox um die vertikale y -Achse des POV Koordinatensystems um den Wert β entgegen dem Uhrzeigersinn erfolgen, um eine richtige Sensorperspektive auf das Modell zu gewährleisten (grüne Markierung in Abb. 3.17). Dies bedeutet, dass Folgendes gilt:

$$\beta \begin{cases} > 0^\circ : & \text{Rotation gegen Uhrzeigersinn} \\ < 0^\circ : & \text{Rotation im Uhrzeigersinn} \end{cases} \quad (3.20)$$

In POV-Ray liegen der Definition von Rotationen hingegen folgende Festlegungen zugrunde:

$$\rho_{Mo} \begin{cases} > 0^\circ : & \text{Rotation im Uhrzeigersinn} \\ < 0^\circ : & \text{Rotation gegen Uhrzeigersinn} \end{cases} \quad (3.21)$$

Aus den beiden Bedingungen in 3.20 und 3.21 ergibt sich damit die allgemeine Beschreibung der Drehung der Modellbox durch die in Formel 3.19 aufgestellte Beziehung.

Nach Durchführung der Rotation des Modells resultiert die in Abb. 3.17 rechts dargestellte Szene, bei der der Sensor an der in Formel 3.11 benutzerdefinierte Stelle $\vec{X}_{Se,POV}$ liegt, die Aufnahme-perspektive jedoch aufgrund der gedrehten Modellbox der Realität entspricht.

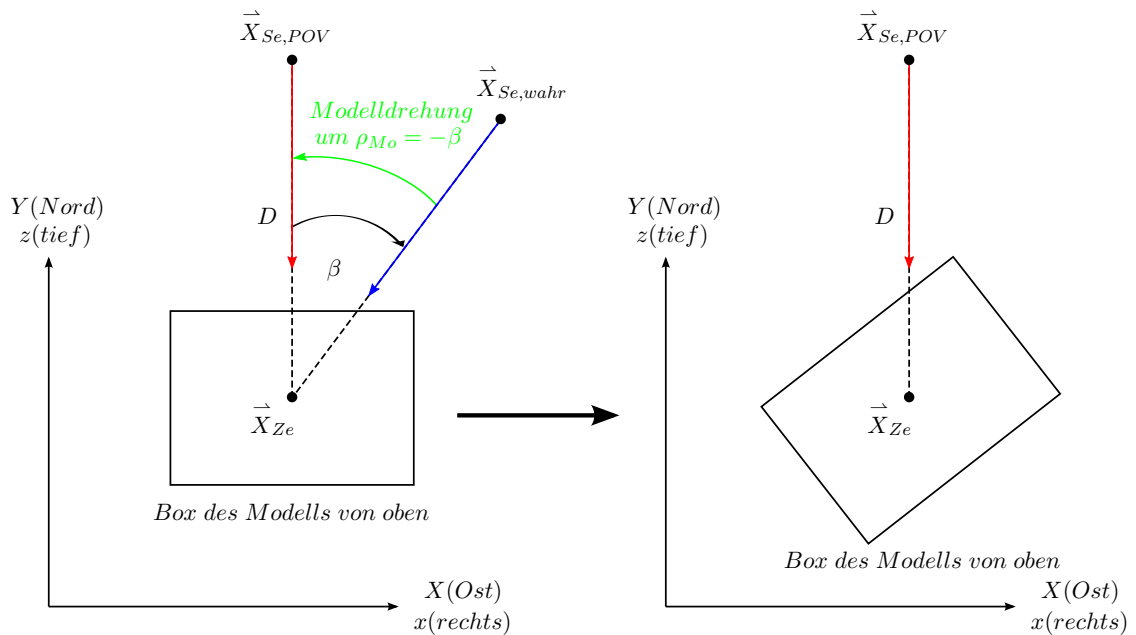


Abbildung 3.17 – Rotation des Modells

Um nach genauer Erläuterung des Rotationswinkels ρ_{Mo} nun auf dessen Bedeutung für die Definition der Sonnenposition im POV Koordinatensystem zurückzukommen, wird sich auf Abb. 3.15(b) bezogen. Da sich α_{So} und ε_{So} für die Definition der Sonnenposition auf die Nordachse des UTM Koordinatensystems beziehen und die z -Achse des lokalen POV Koordinatensystems dieser gleichgesetzt ist (vgl. Abb. 3.14), gilt die Definition der beiden genannten Winkel ebenso in Bezug auf die z -Koordinatenachse im POV System. Wird die Box zur Einstellung der Sensorperspektive in ihrem Zentrum um die y -Achse im POV System um den Rotationswinkel ρ_{Mo} rotiert (blaue Einfärbung in Abb. 3.15(b)), muss auch die Sonnenposition um denselben Winkel mitgedreht werden (vgl. Formel 3.17). Dadurch wird sichergestellt, dass der Standort der Lichtquelle bezüglich der Objekte im zu simulierenden Bild, trotz Drehung der Modellbox, korrekt ist.

Neben der Angaben zu der soeben beschriebenen Ausrichtung des Modells ist es notwendig auch die Textur der Objekte im Modell für den Ray Tracer zu definieren. Dafür können sowohl das Farbmuster als auch die Oberflächeneigenschaften des Modells in der .pov Datei festgelegt werden. Für die Farbe der Objekte im Modell werden die RGB Werte (1, 1, 1) gewählt. Die wichtigsten Reflexionsparameter der Modelloberfläche sind nachfolgend aufgeführt und werden anhand von [Lohmüller 2006b] erläutert:

- 'reflection':
Dieser Parameter gibt den Spiegelungsanteil der im System vorkommenden Helligkeit an.
- 'ambient':
Über den Parameter 'ambient' können Einstellungen bezüglich der Helligkeit des simulierten Schattens eines Objekts vorgenommen werden, die durch indirekte Umgebungsbeleuchtung hervorgerufen wird.
- 'diffuse':
Der Parameter 'diffuse' gibt den Anteil diffuser Reflexionen im System an.
- 'specular':
Der Parameter 'specular' gibt den Anteil spiegelnder Reflexionen im System an.

3.2.4 Durchführung des Ray Tracings in POV-Ray

Im vierten Schritt der GeoRayOpt Prozessierung wird dem Ray Tracer sowohl die um Sensor-, Licht- und Modellinformationen ergänzte .pov Datei als auch die Größe des zu simulierenden Bildes ($N_{Z,Simu}$ und $N_{S,Simu}$) als Input übergeben und die Strahlverfolgung gestartet. Die Dreiecksflächen des generierten 3D Modells aus Abschnitt 3.2.1 werden mit den von der Sensorposition ausgesendeten Strahlen geschnitten. Wie in Abschnitt 2.2.3 bereits beschrieben, werden dabei alle Beiträge von allen Oberflächen, die ein Strahl bei der Strahlverfolgung durch ein Pixel kreuzt, aufsummiert und zum resultierenden Grauwert eines Pixels verrechnet. Trifft der Strahl beispielsweise auf eine Wasseroberfläche und eine Gebäudefassade auf, werden die jeweiligen Reflexionsbeiträge aufaddiert und der resultierende Grauwert dem Pixel im in POV-Ray simulierten Bild zugeordnet.

Als Output liefert der Ray Tracer ein von der jeweiligen Szene simuliertes Abbild. Da POV-Ray in einem lokalen Koordinatensystem arbeitet (POV Koordinatensystem), weist das resultierende simulierte Bild keinerlei Bezug zu Absolutkoordinaten auf. Aus diesem Grund muss im Anschluss an das Rendern des Bildes eine Geokodierung stattfinden.

3.2.5 Geokodierung des simulierten Bildes

Um einen Vergleich des aus POV-Ray resultierenden gerenderten Bildes mit dem zugehörigen realen hochauflösenden optischen Satellitenbild zu ermöglichen, muss im letzten Schritt der Prozessierungskette der Bezug zu UTM Koordinaten wiederhergestellt werden. Allgemein kann die Geokodierung dabei in zwei Hauptschritte unterteilt werden. Im ersten Schritt muss das in POV-Ray simulierte Bild durch eine Rotation nach Norden ausgerichtet werden und gegebenenfalls unwichtige Bildbereiche entfernt werden. Die dabei gewählte Vorgehensweise wird in Abb. 3.18 anhand eines LiDAR DOMs der Frauenkirche in München veranschaulicht, das auf Basis von Bilddaten einer optischen WV2 Aufnahme simuliert ist.

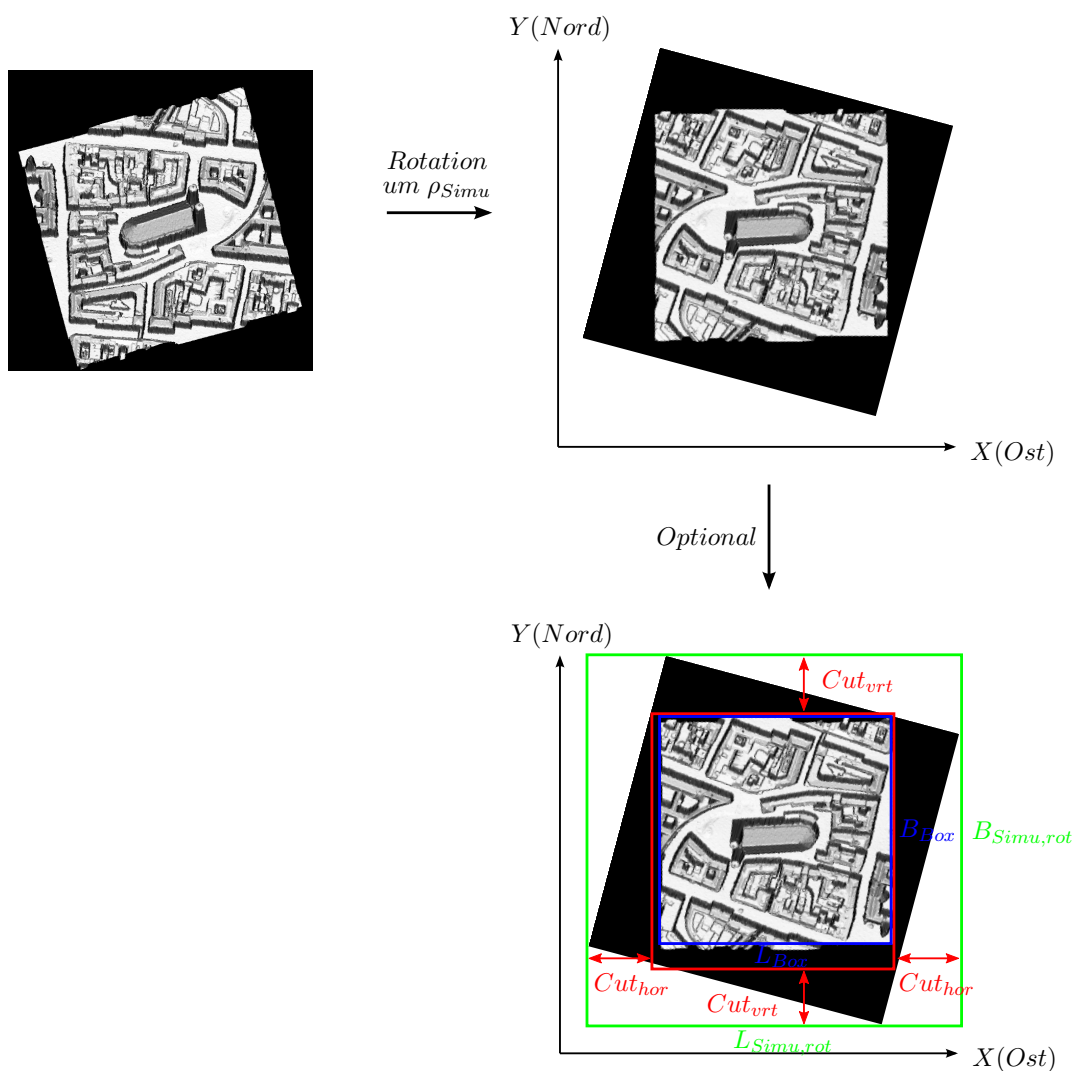


Abbildung 3.18 – Geokodierung des in POV-Ray gerenderten Bildes

Die linke Graphik in Abb. 3.18 zeigt das aus dem Ray Tracer resultierende Bild, das lediglich lokale Bildkoordinaten besitzt. Zur Ausrichtung nach Norden muss dieses um den Rotationswinkel ρ_{Simu} gedreht werden. Der Rotationswinkel ρ_{Simu} lässt sich in Formel 3.22 mit Hilfe des Blickwinkels β berechnen.

$$\rho_{Simu} = 180^\circ - \beta - 360^\circ \quad (3.22)$$

Die Drehrichtung ist in Formel 3.23 in Abhängigkeit vom Vorzeichen des Rotationswinkels definiert.

$$\rho_{Simu} \begin{cases} > 0^\circ : & \text{Rotation gegen Uhrzeigersinn} \\ < 0^\circ : & \text{Rotation im Uhrzeigersinn} \end{cases} \quad (3.23)$$

Das rotierte gerenderte Bild in der rechten oberen Graphik in Abb. 3.18 weist die richtige Orientierung nach Norden auf.

Wie oben bereits erwähnt, können nach Einnordung des Bildes optional noch Bildbereiche entfernt werden, die keinen wesentlichen Beitrag zum simulierten Bild liefern. Zur Erläuterung der dafür notwendigen Berechnungen wird auf die rechte untere Graphik in Abb. 3.18 eingegangen. Zunächst wird die gesamte Nord-Ost-Ausdehnung des rotierten simulierten Bildes bestimmt. Dafür wird der grün dargestellte Rahmen entlang der Ecken des Bildes aufgespannt und dessen Länge $L_{Simu,rot}$ und Breite $B_{Simu,rot}$ anhand von Formel 3.24 berechnet.

$$\begin{aligned} L_{Simu,rot} &= \|M \cdot \cos(\delta) + L_{Box}\| & \text{m} \\ B_{Simu,rot} &= \|M \cdot \sin(\delta) + B_{Box}\| & \text{m} \end{aligned} \quad (3.24)$$

Die Nord-Ost-Ausdehnung des gedrehten gerenderten Bildes in Formel 3.24 wird von drei Faktoren beeinflusst. Zum einen spielt die horizontale Ausdehnung der Modellbox L_{Box} und B_{Box} eine zentrale Rolle. Zum anderen geht die vertikale Ausdehnung der Box über M in die Berechnung von $L_{Simu,rot}$ und Breite $B_{Simu,rot}$ mit ein. Durch die Tatsache einer von der Nadirrichtung abweichenden Aufnahme ($\theta \in]0^\circ, 90^\circ]$) kommt es zur Überlagerung der Modellbox im simulierten Bild. Der vertikale Lagerversatz der Objekte in der Box erfolgt bei Simulation auf Basis optischer Satellitenbilddaten in dieselbe Richtung wie die Blickrichtung des aufnehmenden Sensors. M gibt das Ausmaß der Überlagerung der Box im gerenderten Bild an und kann nach Abb. 3.19 in Formel 3.25 über die Höhe der Box H_{Box} und den Einfallswinkel θ errechnet werden. Je größer der Einfallswinkel ist, desto größer ist die vertikale Ausdehnung der Box M im simulierten Bild. Würde der optische Sensor in Nadirrichtung aufnehmen und damit ein Einfallswinkel von $\theta = 0^\circ$ vorliegen, wäre $M = 0$ m und keine Überlagerung der Modellbox vorhanden.

$$M = H_{Box} \cdot \tan(\theta) \quad \text{m} \quad (3.25)$$

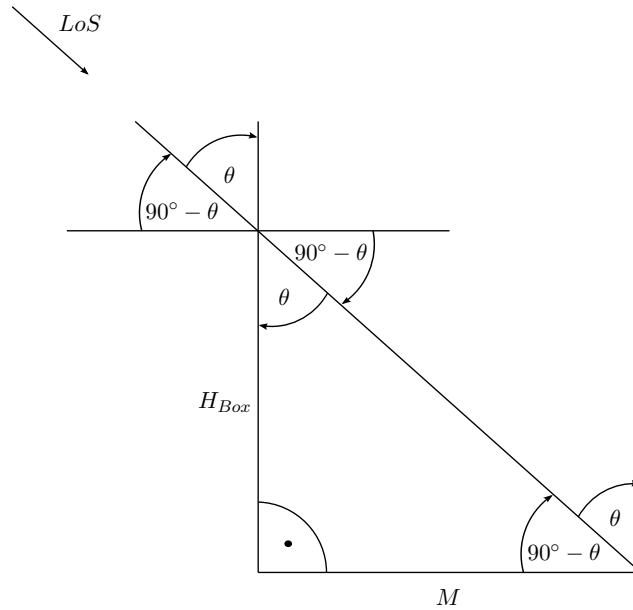


Abbildung 3.19 – Überlagerung der Modellbox aufgrund des schräg blickenden Sensors

Der dritte Faktor, der die grün markierte Nord-Ost-Ausdehnung des rotierten Gesamtbildes in Abb. 3.18 beeinflusst, ist der Winkel δ . Dieser definiert den Winkel, der von der UTM X -Achse zur LoS des optischen Sensors entgegen des Uhrzeigersinns verläuft. Zur Bestimmung von δ wird der in Formel 3.8 ermittelte Blickwinkel β herangezogen (vgl. Formel 3.26).

$$\delta = \begin{cases} 90^\circ - \beta & \text{falls } \beta \in [0^\circ, 90^\circ] \\ 360^\circ - \beta + 90^\circ & \text{falls } \beta \in]90^\circ, 360^\circ[\end{cases} \quad (3.26)$$

Nun stehen alle notwendigen Größen zur Berechnung von $L_{Simu,rot}$ und $B_{Simu,rot}$ zur Verfügung. Im Anschluss werden in Formel 3.27 die beiden Beiträge Cut_{hor} und Cut_{vrt} ermittelt, anhand derer das rotierte simulierte Bild zugeschnitten wird, um uninteressante Bildinhalte, die keinen Beitrag zur simulierten Szene liefern, zu entfernen (vgl. Abb. 3.18). Die Länge des rotierten, simulierten Bildes $L_{Simu,rot}$ wird dabei um Cut_{hor} gekürzt und von $B_{Simu,rot}$ wird Cut_{vrt} abgezogen.

$$\begin{aligned} Cut_{hor} &= \|B_{Box} \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\delta)\| & \text{m} \\ Cut_{vrt} &= \|L_{Box} \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\delta)\| & \text{m} \end{aligned} \quad (3.27)$$

Nach Zuschneiden des eingeordneten gerenderten Bildes resultiert der in Abb. 3.18 rot markierte Bereich. Dieser stimmt nicht exakt mit dem blauen Rahmen überein, der den Bereich darstellt, den das Modell abdeckt. Grund hierfür ist die vereinfachte Berechnung auf Basis der in Abschnitt 3.2.1 definierten Box, die das Modell umspannt. Die Höhe der Box H_{Box} wird zwar anhand des höchsten Objekts im Modell festgelegt, dieses muss jedoch nicht zwingend am Rand der Box stehen, sondern kann möglicherweise eine Stelle inmitten dieser einnehmen. Die Position des Objekts in der Box hat Auswirkungen auf dessen Abbildungseffekt im gerenderten Bild. Zum besseren Verständnis sind in Abb. 3.20(a) bis 3.20(h) acht verschiedene Abbildungsmöglichkeiten von zwei unterschiedlich ho-

hen Objekten (rot und blau) im Modell für unterschiedliche Positionen aufgezeigt.

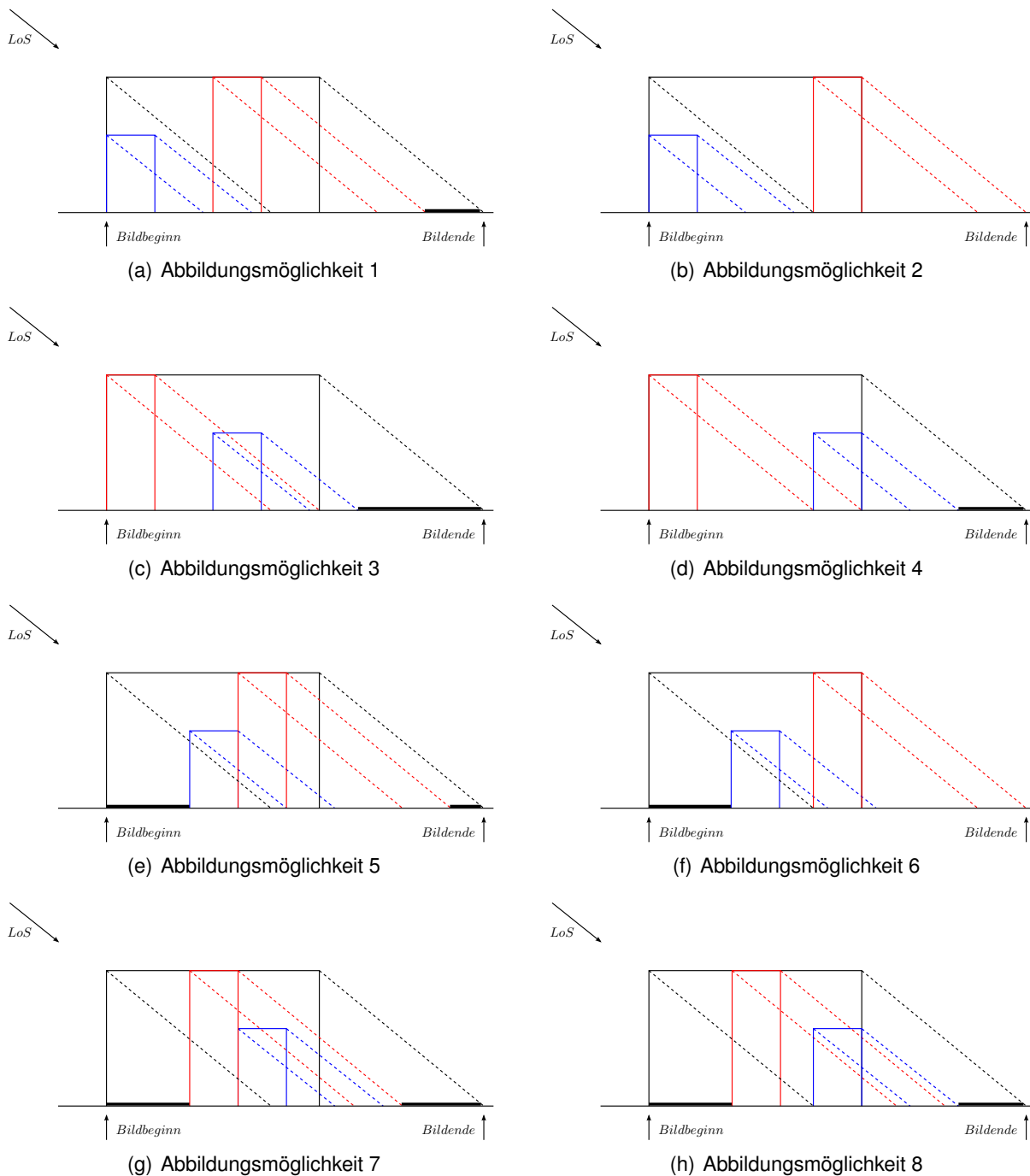


Abbildung 3.20 – Abbildung der Objekte im simulierten Bild; rot: Höchstes Objekt im Modell; blau: Niedrigstes Objekt im Modell

Wie zu erkennen ist, ergeben sich aufgrund der geometrischen Verzerrung der Objekte und der Verwendung einer Box als Berechnungsgrundlage je nach Höhe und Lage der Objekte im Modell entweder am Bildanfang und/oder am Bildende schwarze Bereiche im simulierten Bild. Da in den schwarzen Bereichen keine Informationen des Modells zugrunde liegen, können die ausgesendeten Strahlen beim Ray Tracing keine Objektoberfläche schneiden, wodurch keine Reflexionsbei-

träge aufsummiert werden können und den dort befindlichen Pixeln der Grauwert 0 (= schwarz) zugewiesen wird. Falls die Objekte im Modell zufällig so angeordnet sind, dass die Ausdehnung der Modellbox im gerenderten Bild mit der der Objekte übereinstimmt, existieren keine schwarzen Bildbereiche (vgl. Abb. 3.20(b)).

Um dem simulierten Bild Absolutkoordinaten zuzuweisen, müssen in Formel 3.28 und 3.29 über eine vom Winkel δ abhängige Fallunterscheidung die UTM Koordinaten der Mitte des linken oberen Pixels des simulierten Bildes $X_{lo,Simu}$ und $Y_{lo,Simu}$ berechnet werden. Die Größen, die neben dem Winkel δ dafür benötigt werden, sind die UTM Koordinaten des linken oberen Pixels des Modells ($X_{lo,Mo}$ und $Y_{lo,Mo}$) und das Ausmaß der Überlagerung der Modellbox M .

$$X_{lo,Simu} = \begin{cases} X_{lo,Mo} & \text{falls } \cos(\delta) \leq 0 \\ X_{lo,Mo} - M \cdot \cos(\delta) & \text{falls } \cos(\delta) > 0 \end{cases} \quad \text{m} \quad (3.28)$$

$$Y_{lo,Simu} = \begin{cases} Y_{lo,Mo} & \text{falls } \sin(\delta) \geq 0 \\ Y_{lo,Mo} - M \cdot \sin(\delta) & \text{falls } \sin(\delta) < 0 \end{cases} \quad \text{m} \quad (3.29)$$

Zum besseren Verständnis von Formel 3.28 und 3.29 sind in Tab. 3.2 vier Beispiele aufgeführt, für die mit Hilfe von Abb. 3.21(a) bis 3.21(d) die durchgeführten Berechnungen nachvollzogen werden können. In der ersten Zeile von Tab. 3.2 sind beispielhaft vier verschiedene Blickwinkel aufgelistet, die alle in einem unterschiedlichen Quadranten liegen. In Zeile zwei stehen die über Formel 3.26 ermittelten Winkel δ zwischen der UTM X -Achse und der Blickrichtung des Sensors (gegen Uhrzeigersinn). Je nachdem, in welchem der vier Quadranten sich β befindet, wird für die Bestimmung von δ unterschiedlich vorgegangen (vgl. Formel 3.26). Die dritte und vierte Zeile von Tab. 3.2 geben an, ob die beiden trigonometrischen Funktionen Cosinus und Sinus für entsprechende δ einen positiven oder negativen Wert aufweisen. Aufgrund der Tatsache, dass es in hochauflösenden optischen Satellitenbildern zur geometrischen Verzerrung von Objekten in Richtung der LoS des aufnehmenden Sensors kommt, müssen die UTM Koordinaten des simulierten Bildes $X_{lo,Simu}$ und $Y_{lo,Simu}$ je nach Blickwinkel β (bzw. je nach Winkel δ) angepasst werden. Bei der Anpassung spielt das Ausmaß der Überlagerung M eine Rolle, da mit größer werdendem M auch die UTM Koordinaten des Pixels in der linken oberen Ecke des simulierten Bildes $\vec{X}_{lo,Simu}$ mehr von denen des Modells $\vec{X}_{lo,Mo}$ abweichen. Wie in Tab. 3.2 (Zeile fünf) dargestellt, nimmt M stets positive Werte an. Abb. 3.21(a) bis 3.21(d) veranschaulichen die Feinjustierung der UTM Koordinaten graphisch, wobei das blaue Rechteck jeweils das Modell und das rote Rechteck die Überlagerung der Modellbox M verdeutlichen sollen. Das schwarz gestrichelte Rechteck stellt das simulierte Bild dar, bei dem die Koordinaten $\vec{X}_{lo,Simu}$ in drei von vier Fällen von den Koordinaten $\vec{X}_{lo,Mo}$ abweichen (vgl. Abb. 3.21(a) bis 3.21(c)). Neben der graphischen Darstellung in Abb. 3.21 drücken Zeile sechs und sieben in Tab. 3.2 die Berechnungen, welche in Formel 3.28 und 3.29 durchgeführt werden, aus. Dabei bedeutet '+', dass $X_{lo,Simu}$ bzw. $Y_{lo,Simu}$ in die positive Richtung der UTM Achse X bzw. Y verschoben werden. '-' stellt dementsprechend eine Verschiebung in die negativen Richtungen dar.

Tabelle 3.2 – Vier Beispiele zur Ermittlung der UTM Koordinaten des Pixels in der nordwestlichen Ecke des simulierten Bildes, vgl. Abb. 3.21

	Beispiel 1	Beispiel 2	Beispiel 3	Beispiel 4
β	50°	120°	220°	330°
δ	40°	330°	230°	120°
$\cos(\delta)$	> 0	> 0	< 0	< 0
$\sin(\delta)$	> 0	< 0	< 0	> 0
M in m	> 0	> 0	> 0	> 0
$X_{lo,Simu}$ in m	–	–	$= X_{lo,Mo}$	$= X_{lo,Mo}$
$Y_{lo,Simu}$ in m	$= Y_{lo,Mo}$	+	+	$= Y_{lo,Mo}$

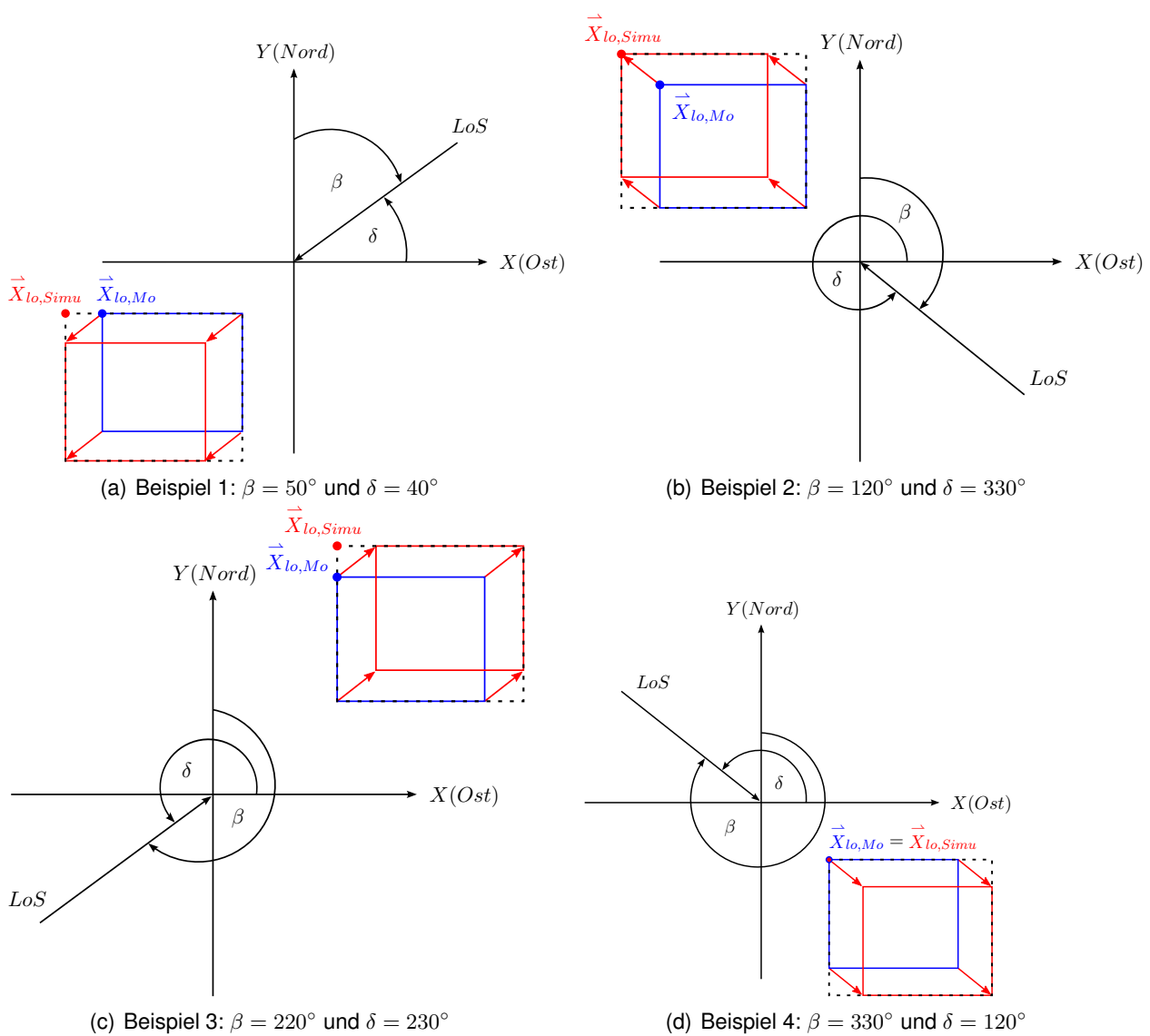


Abbildung 3.21 – Berechnung der UTM Koordinaten des Pixels in der linken oberen Ecke des simulierten Bildes, vgl. Tab. 3.2

Wird auf den optionalen Zuschnitt des eingenordeten simulierten Bildes um Cut_{hor} und Cut_{vrt} verzichtet, weichen die UTM Koordinaten des Pixels der linken oberen Ecke von denen in Formel 3.28 und 3.29 ab und müssen über die in Formel 3.27 bestimmten Beiträge aktualisiert werden.

$$\begin{aligned} X_{lo,Simu} &= X_{lo,Simu} - Cut_{hor} & \text{m} \\ Y_{lo,Simu} &= Y_{lo,Simu} + Cut_{vrt} & \text{m} \end{aligned} \quad (3.30)$$

Wird jedoch nicht von einer Verkleinerung des eingenordeten simulierten Bildes abgesehen, entfällt die in Formel 3.30 aufgeführte Berechnung.

Dadurch, dass das Pixel in der linken obere Ecke des gerenderten Bildes, ob mit oder ohne Zuschnitt, nun UTM Koordinaten besitzt und das Bild zudem eingenordet ist, weisen auch die restlichen Pixel des simulierten Bildes Absolutkoordinaten auf.

Im zweiten Hauptschritt der Geokodierung wird der Bezug zwischen dem eingenordeten, UTM Koordinaten besitzenden simulierten Bild der Szene und dem entsprechenden originalen hochauflösenden optischen Satellitenbild hergestellt. Dabei müssen deren unterschiedliche Projektionsebenen berücksichtigt werden. Das simulierte Bild ist auf eine Ebene projiziert, die sich auf die minimale Höhe der Modellbox $H_{Box,min}$ bezieht. Im Gegensatz dazu basiert die optische Satellitenaufnahme auf der Referenzhöhe H_{ref} , die entweder in den Metadaten gegeben ist oder vom Satellitenbetreiber in Erfahrung gebracht werden muss. Der Unterschied in den zugrundeliegenden Höhen führt zu einem konstanten Versatz zwischen dem simulierten und dem originalen Bild. Zur Beseitigung des Einflusses der verschiedenen Projektionsebenen wird die horizontale Verschiebung des simulierten Bildes entlang der UTM X -Achse V_X und entlang der UTM Y -Achse V_Y in Formel 3.31 berechnet.

$$\begin{aligned} V_X &= -V \cdot \cos(\alpha_{Rba}) & \text{m} \\ V_Y &= V \cdot \sin(\alpha_{Rba}) & \text{m} \end{aligned} \quad (3.31)$$

Der Betrag der Verschiebung V kann in Formel 3.32 über die Höhendifferenz H_{diff} zwischen den beiden Projektionsebenen (vgl. Formel 3.33) und dem Einfallswinkel der Sensorstrahlen am Objekt θ ermittelt werden.

$$V = H_{diff} \cdot \tan(\theta) \quad \text{m} \quad (3.32)$$

$$H_{diff} = H_{ref} - H_{Box,min} \quad \text{m} \quad (3.33)$$

Wie in Abb. 3.22 violett dargestellt, erfolgt die Verschiebung V des simulierten Bildes (blau) für $H_{diff} > 0$ m innerhalb der Bildebene (grün) entgegengesetzt zum Abbildungseffekt der rot markierten Objekte im simulierten Bild und somit entgegengesetzt zur LoS des optischen Sensors. Liegt jedoch die cyan dargestellte Projektionsebene des optischen Satellitenbildes $H_{ref,Opt}$ unterhalb der

des simulierten optischen Bildes $H_{Box,min}$, tritt der ebenso in Abb. 3.22 gezeigte Fall ② $H_{diff} < 0$ m ein. Hier erfolgt der Versatz V in dieselbe Richtung wie die Blickrichtung des Sensors. Neben dem Betrag der Verschiebung V und der soeben beschriebenen tendenziellen Richtung des Versatzes für Fall ① und ② liefern die Beiträge von $\cos(\alpha_{Rba})$ und $\sin(\alpha_{Rba})$ in Formel 3.31 über den Winkel zwischen der UTM Nordachse und der Rechtswert-Bildachse α_{Rba} (vgl. Formel 3.13) die exakte Richtung des Versatzes innerhalb der horizontalen UTM X - Y -Ebene.

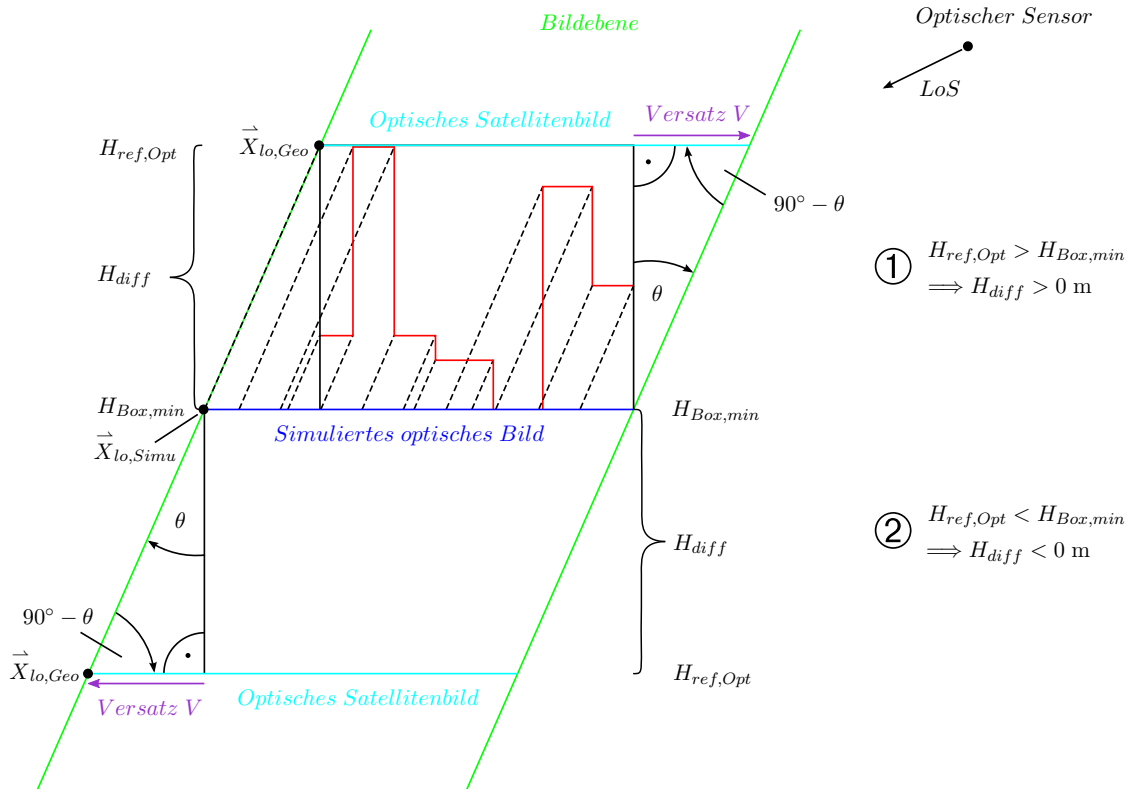


Abbildung 3.22 – Berücksichtigung verschiedener Projektionsebenen bei der Geokodierung: Versatz bei Simulation auf Basis von optischen Bilddaten

In Anschluss an die Ermittlung der Verschiebungsbeiträge V_X und V_Y des simulierten Bildes können diese mit den in Formel 3.28 und 3.29 (oder optional in Formel 3.30) bestimmten UTM Koordinaten des Pixels der linken oberen Ecke in Formel 3.34 verrechnet werden. Es resultieren die georeferenzierten UTM Koordinaten der Mitte des Pixels in der linken oberen Ecke des simulierten Bildes $\vec{X}_{lo,Geo} = (X_{lo,Geo}, Y_{lo,Geo})$. Diese sind um den konstanten Versatz zwischen dem simulierten und dem originalen optischen Bild korrigiert.

$$\begin{aligned} X_{lo,Geo} &= X_{lo,Simu} + V_X & \text{m} \\ Y_{lo,Geo} &= Y_{lo,Simu} + V_Y & \text{m} \end{aligned} \quad (3.34)$$

Zum besseren Verständnis der für die Korrektur der Geokodierung durchgeführten Berechnungen, werden wiederum die vier Beispielwerte für den Blickwinkel β aus Tab. 3.2 herangezogen und die Ergebnisse der einzelnen Berechnungsschritte tabellarisch aufgeführt. Tab. 3.3 bezieht sich dabei

auf den Fall, bei dem die Referenzhöhe des optischen Originalbildes $H_{ref,Opt}$ größer ist als die Projektionshöhe des simulierten Bildes $H_{Box,min}$ (Fall ① in Abb. 3.22). Dahingegen fasst Tab. 3.4 die Resultate für den in Abb. 3.22 dargestellten Fall ② zusammen.

Tabelle 3.3 – Vier Beispiele zur Ermittlung der georeferenzierten UTM Koordinaten des Pixels in der nordwestlichen Ecke des simulierten Bildes für Fall ① $H_{diff} > 0$ m, vgl. Abb. 3.23

	Beispiel 1	Beispiel 2	Beispiel 3	Beispiel 4
β	50°	120°	220°	330°
$\alpha_{RBa} = \beta + 90^\circ$	140°	210°	310°	$420^\circ \hat{=} 60^\circ$
$\cos(\alpha_{RBa})$	< 0	< 0	> 0	> 0
$\sin(\alpha_{RBa})$	> 0	< 0	< 0	> 0
$\tan(\theta), \theta \in]0^\circ, 90^\circ]$	> 0	> 0	> 0	> 0
V in m	> 0	> 0	> 0	> 0
V_X in m	> 0	> 0	< 0	< 0
V_Y in m	> 0	< 0	< 0	> 0
$X_{lo,Geo}$ in m	+	+	–	–
$Y_{lo,Geo}$ in m	+	–	–	+

Tabelle 3.4 – Vier Beispiele zur Ermittlung der georeferenzierten UTM Koordinaten des Pixels in der nordwestlichen Ecke des simulierten Bildes für Fall ② $H_{diff} < 0$ m, vgl. Abb. 3.23

	Beispiel 1	Beispiel 2	Beispiel 3	Beispiel 4
β	50°	120°	220°	330°
$\alpha_{RBa} = \beta + 90^\circ$	140°	210°	310°	$420^\circ \hat{=} 60^\circ$
$\cos(\alpha_{RBa})$	< 0	< 0	> 0	> 0
$\sin(\alpha_{RBa})$	> 0	< 0	< 0	> 0
$\tan(\theta), \theta \in]0^\circ, 90^\circ]$	> 0	> 0	> 0	> 0
V in m	< 0	< 0	< 0	< 0
V_X in m	< 0	< 0	> 0	> 0
V_Y in m	< 0	> 0	> 0	< 0
$X_{lo,Geo}$ in m	–	–	+	+
$Y_{lo,Geo}$ in m	–	+	+	–

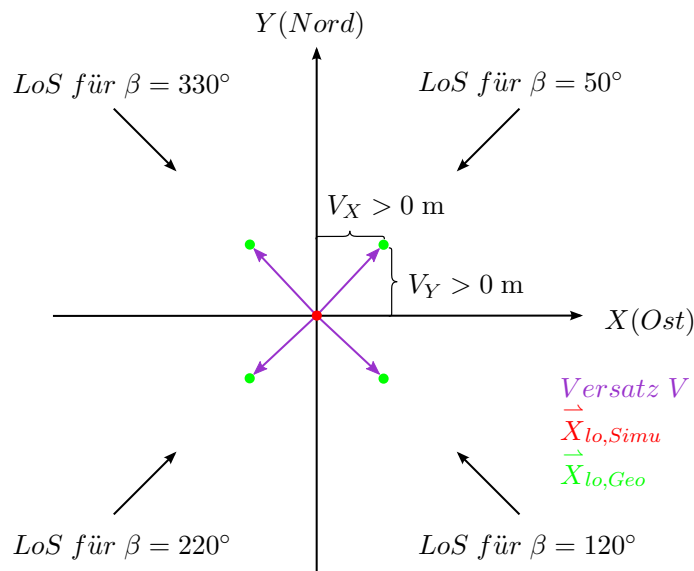


Abbildung 3.23 – Veranschaulichung der Berechnungen zur Korrektur der Geokodierung, vgl. Tab. 3.3 und 3.4

Werden die Ergebnisse für $X_{lo,Geo}$ und $Y_{lo,Geo}$ aus Tab. 3.3 und 3.4 in Zusammenhang mit Abb. 3.23 betrachtet, kann festgestellt werden, dass für jede beliebige LoS des Sensors die Verschiebung des simulierten Bildes zur finalen Georeferenzierung in die richtige Richtung erfolgt. Wird Beispiel 1 in Tab. 3.3 herausgegriffen, ergibt sich nach Formel 3.32 für V ein positiver Wert, da $H_{diff} > 0 \text{ m}$ und der Einfallswinkel θ unter der Annahme einer Schrägsicht Werte zwischen $]0^\circ, 90^\circ]$ annimmt. Folglich ist auch $\tan(\theta)$ immer größer als Null. Aufgrund der Tatsache, dass sich der Sensor im ersten Quadranten befindet ($\beta = 50^\circ$) und der Versatz V für $H_{diff} > 0 \text{ m}$ in die entgegengesetzte Blickrichtung des Sensors erfolgt, müssen sowohl die X - als auch die Y -Komponente des Pixels der linken oberen Ecke des simulierten Bildes $X_{lo,Simu}$ und $Y_{lo,Simu}$ in die positive X - und positive Y -Achse verschoben werden (vgl. Abb. 3.23). Folglich müssen V_X und V_Y nach Formel 3.34 beide größer als Null sein. Da sich nun jedoch für $\cos(\alpha_{Rba})$ ein negativer Wert ergibt, muss für die Berechnung von V_X in Formel 3.31 ein negatives Vorzeichen gewählt werden. Für die Ermittlung von V_Y entfällt diese Maßnahme, da $\sin(\alpha_{Rba}) > 0$. Zusammenfassend ergibt sich, dass sowohl $X_{lo,Geo}$ als auch $Y_{lo,Geo}$ Koordinaten darstellen, die gegenüber $X_{lo,Simu}$ und $Y_{lo,Simu}$ in die positive UTM X - und Y -Achse verschoben sind. Diese Gegebenheit wird mit einem '+' ausgedrückt und entspricht der in Abb. 3.23 aufgeführten Zeichnung für diesen dargestellten Fall.

Die soeben ausführlich beschriebene Vorgehensweise zur Verfeinerung der Geokodierung kann auf alle weiteren Fälle in Tab. 3.3 und 3.4 übertragen werden. Dabei ist zu erkennen, dass überall dort, wo über '+' in Tab. 3.3 eine Verschiebung in die positive Richtung einer UTM Achse erfolgen muss, in Tab. 3.4 ein über '-' gekennzeichnete Versatz in die negative Richtung vorgenommen wird und umgekehrt. Dies erklärt die Verschiebung des simulierten Bildes in entgegengesetzte Richtungen für $H_{diff} > 0 \text{ m}$ und $H_{diff} < 0 \text{ m}$ (vgl. Abb. 3.22 und 3.23).

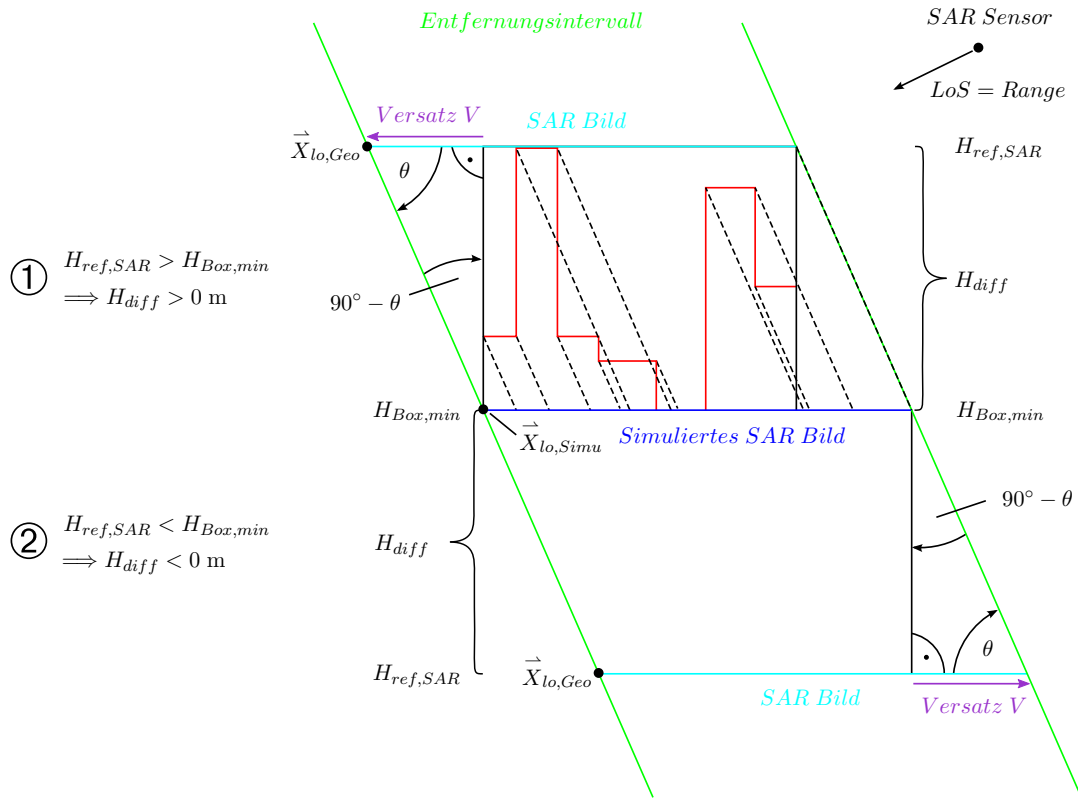


Abbildung 3.24 – Berücksichtigung verschiedener Projektionsebenen bei der Geokodierung: Versatz bei Simulation auf Basis von SAR Bilddaten

Zum Vergleich ist in Abb. 3.24 das Zustandekommen der Verschiebung eines simulierten SAR Bildes zur Korrektur der Geokodierung aufgezeigt. Da hier das Entfernungsintervall gleich bleiben muss, erfolgt die Verschiebung des simulierten Bildes zur Berücksichtigung der verschiedenen Projektionsebenen für $H_{diff} > 0 \text{ m}$ in LoS des Sensors und für $H_{diff} < 0 \text{ m}$ entgegengesetzt zur Blickrichtung des Sensors. Damit ergibt sich für die Simulation anhand von SAR Bilddaten eine gegenteilige Vorgehensweise wie bei einer auf optischen Bilddaten beruhenden Simulation. Der Vollständigkeit halber sind in Formel 3.35 und 3.36 die Berechnungen zur Ermittlung der georeferenzierten UTM Koordinaten eines simulierten SAR Bildes aufgeführt, die zusammen mit Abb. 3.24 lediglich den Unterschied zu den in Formel 3.31 bis 3.34 dargestellten Berechnungen verdeutlichen sollen.

$$\begin{aligned}
 X_{lo,Geo} &= X_{lo,Simu} + V_X \\
 &= X_{lo,Simu} + V \cdot \cos(\alpha_{Se,SAR}) \\
 &= X_{lo,Simu} + H_{diff} \cdot \tan(90^\circ - \theta) \cdot \cos(\alpha_{Se,SAR})
 \end{aligned}
 \quad \text{m} \quad (3.35)$$

$$\begin{aligned}
 Y_{lo,Geo} &= Y_{lo,Simu} + V_Y \\
 &= Y_{lo,Simu} - V \cdot \sin(\alpha_{Se,SAR}) \\
 &= Y_{lo,Simu} - H_{diff} \cdot \tan(90^\circ - \theta) \cdot \sin(\alpha_{Se,SAR})
 \end{aligned}
 \quad \text{m} \quad (3.36)$$

3.3 Kombinationen der Simulationsparameter in GeoRayImg

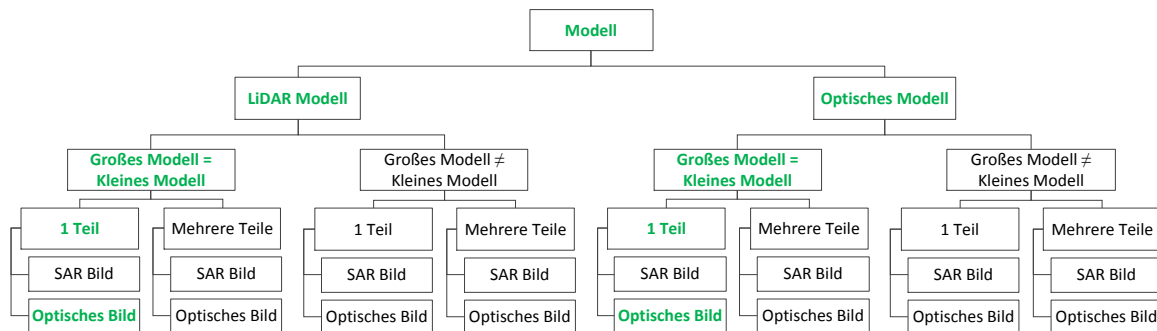


Abbildung 3.25 – Übersicht über Kombinationsmöglichkeiten der Simulationsparameter in GeoRayImg (GeoRaySAR + GeoRayOpt)

Wie in Abb. 3.25 zu sehen ist, ist der Simulator GeoRayImg nach Erweiterung von GeoRaySAR um GeoRayOpt in der Lage, durch Kombination verschiedener Eingabedaten unterschiedliche Simulationen durchzuführen. Bei den eingehenden digitalen Modellen kann unterschieden werden zwischen:

- LiDAR Modell
 - LiDAR DOM
 - LiDAR DGM
 - LiDAR nDOM
- Optisches Modell
 - Optisches DOM
 - Optisches DGM
 - Optisches nDOM

Je nachdem, welches der oben genannten Modelle und welcher Bilddatensatz als Input in die Simulation eingehen, wird eine bestimmte Kombination ausgewählt und das entsprechende Bild simuliert.

Falls die zu simulierende Szene sehr groß ist und die Rechenkapazität des Computers nicht ausreicht, um eine Simulation der gesamten Szene durchzuführen, wird das digitale Modell anhand eines 'default' Wertes ab einer gewissen Größe in mehrere Teile zerlegt (vgl. Abb. 3.25). Anschließend wird jedes einzelne Teil für sich simuliert und daraufhin wieder zu einer großen Gesamtszene zusammengefügt. Unterliegt die Größe des Modells jedoch dem angegebenen 'default' Wert, so entfällt die Aufspaltung in mehrere Teile und die gesamte Szene wird als ein Teil simuliert. Die genaue Vorgehensweise einer solchen Aufteilung und anschließender Zusammenfügung ist [Ileahag 2016] zu entnehmen, da diese dort entwickelt wurde und im Zuge der vorliegenden Masterarbeit lediglich in die Prozessierungskette von GeoRayImg integriert wird.

Für jede Simulation in GeoRayImg wird ein Bezugsrahmen benötigt, der die Größe des zu simulierenden Bildes angibt. Dabei kann unterschieden werden, ob zwei gleich große Modelle (Großes Modell = Kleines Modell) oder zwei verschieden große Modelle (Großes Modell \neq Kleines Modell) gewählt werden (vgl. Abb. 3.25). Bei Ersterem wird ein Modell in Bezug auf dasselbe Modell simuliert, wohingegen bei Letzterem ein kleines Modell, das im größeren Modell enthalten ist, in Bezug auf dieses simuliert wird. Dies bedeutet, dass bei der Ermittlung der Größe des zu simulierenden Bildes (vgl. Abschnitt 3.2.3) das größere Modell herangezogen wird. Diese unterschiedlichen Bezugsrahmen sind für zukünftige Anwendungen interessant, welche in Kapitel 8 genauer beschrieben sind.

Für die in Kapitel 5 durchgeführten Fallstudien liegt das Augenmerk lediglich auf Simulationen, die auf hochauflösenden optischen Bilddaten basieren. Grund hierfür ist, dass, wie in Abschnitt 2.1 bereits dargestellt, eine Simulation auf Basis von SAR Bilddaten (TSX) in [Tao 2015] bereits durchgeführt und erläutert wird. Damit bleibt eine solche Simulation in dieser Arbeit unberücksichtigt. Außerdem geht aus der in Abschnitt 4.2 beschriebenen Datengrundlage hervor, dass keine Aufspaltung in mehrere Teile für die Simulation notwendig ist. Der Fall von unterschiedlichen Modellen (Großes Modell \neq Kleines Modell) bleibt nachfolgend ebenfalls unberücksichtigt. Es werden nur die in Abb. 3.25 grün markierten Kombinationen zur Darstellung der Simulationsergebnisse in Kapitel 5 verfolgt.

Kapitel 4

Optische Sensoren und Datengrundlage

In diesem Kapitel werden die optischen Sensoren vorgestellt, deren Datensätze dieser Masterarbeit vorliegen. Anschließend wird die Datengrundlage beschrieben.

4.1 Optische Sensoren

Da für diese Masterarbeit als Datengrundlage zur Veranschaulichung der Simulationsergebnisse aus GeoRayOpt die Bilddaten der drei verschiedenen Sensoren QB2, PHR1B und WV2 ausgewählt werden (vgl. Abschnitt 4.2), wird in den nachfolgenden Abschnitten 4.1.1 bis 4.1.4 kurz auf diese drei Sensoren eingegangen. Dabei liegt das Augenmerk zum einen auf deren Missions-, Bahn- und Aufnahmedaten, zum anderen auf dem zugrundeliegenden Aufnahmesystem und der jeweiligen Lokalisationsgenauigkeit.

4.1.1 QuickBird-2 Satellit

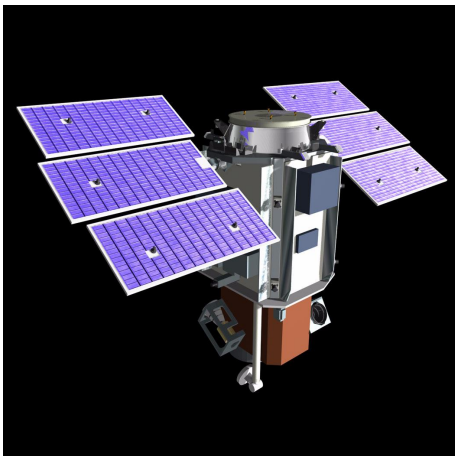


Abbildung 4.1 – QB2 Satellit [ESA 2016b]

Bei dem in Abb. 4.1 dargestellten QB2 Satelliten handelt es sich um einen hochauflösenden, kommerziell betriebenen, optischen Erdbeobachtungssatelliten, der von 2001 bis 2015 auf einer sonnensynchronen Bahn mit einer Inklination von $97,2^\circ$ und einer Orbithöhe von 450 km um die Erde kreiste. Mit einer Umlaufzeit von 93,4 Minuten überflog QB2 die Erdkugel mit einer durchschnittlichen Wiederholrate von 1 bis 3,5 Tagen, was die Bereitstellung hochaufgelöster Daten zur Folge hatte. QB2 lieferte hochauflösende panchromatische Bilder mit einer räumlichen Auflösung von 61 cm und hochauflösende Multispektralbilder mit einer räumlichen Auflösung von 2,4 m (in Nadirrichtung). Diese

werden vom Satellitenbetreiber DigitalGlobe kommerziell zur Verfügung gestellt [ESA 2016b]. Die Bildaufnahme erfolgte mittels eines Zeilenscanners (= Pushbroom Scanner), der aus **C**harged **C**oupled **D**evice (CCD) Sensorelementen besteht, die zeilenweise quer zur Flugrichtung in der Brennebene (= Focal Plane) angeordnet sind. Dabei bilden die vier nacheinander angeordneten Standardkanäle (blue, green, red und Near-IR 1, vgl. Abb. 4.2) das multispektrale Array (MS-Array) der Brennebene (= Focal Plane). Zusätzlich zum MS-Array erfolgte die Bilddatenaufnahme im panchromatischen Array (PAN-Array), das in der Brennebene räumlich unterschiedlich zum MS-Array angebracht ist [Krauß 2014]. Der Spektralbereich des QB2 Satelliten setzt sich aus insgesamt fünf Kanälen zusammen (vgl. Abb. 4.2), deren Wellenlängenbereiche in Tab. 4.1 aufgelistet sind.



Abbildung 4.2 – Spektralbereich des QB2 Satelliten [Pacifici u. Navulur 2011], abgeändert mit Hilfe von [ESA 2016b]

Tabelle 4.1 – Wellenlängenbereich der Spektralbänder des QB2 Satelliten [ESA 2016b]

#	Spektralband	Wellenlänge in nm
B1	blue	450 - 520
B2	green	520 - 600
B3	red	630 - 690
B4	Near-IR 1	760 - 900
B5	Pan	450 - 900

Wie in Abb. 4.3 veranschaulicht, wird bei als Zeilenscanner arbeitenden satellitengetragenen CCD Sensoren die Fortbewegung des Satelliten zur Bildgewinnung genutzt [Tao u. Yu 2011]. Durch die Eigenbewegung des Satelliten von Zeitpunkt $T = t_1$ zu $T = t_2$ bilden die im MS-Array nacheinander angeordneten multispektralen Kanäle denselben Geländebereich der aufgenommenen Szene ab. Außerdem werden die räumlich unterschiedlichen Positionen des PAN- und MS-Arrays in der Brennebene durch die Vorwärtsbewegung des Satelliten fast kompensiert, so dass ein panchromatisches und ein multispektrales Bild mit einem zeitlichen Versatz von 0,2 Sekunden aufgenommen werden kann [Easson u. a. 2010].

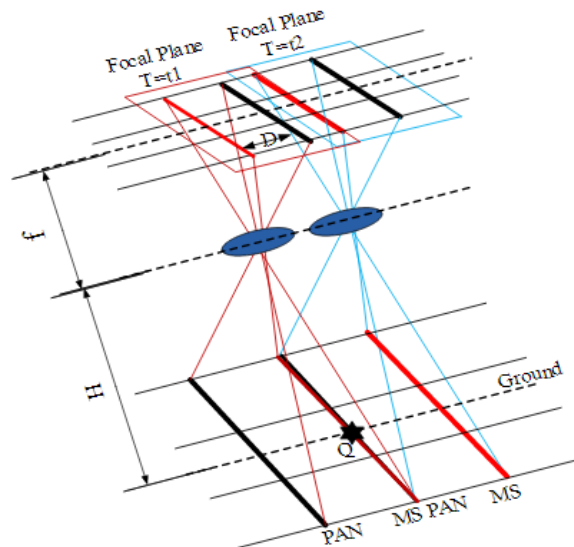


Abbildung 4.3 – Aufnahmeprinzip eines Zeilenscanners [Tao u. Yu 2011]

4.1.2 Pléiades-1B Satellit



Abbildung 4.4 – PHR1B Satellit [Le Gall 2016]

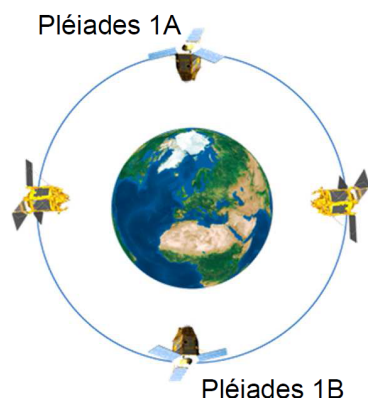


Abbildung 4.5 – Konstellation der beiden Pléiades Satelliten [Global Scan Technologies 2015]

Beim zweiten optischen Sensor handelt es sich um den PHR1B Satelliten, der in Abb. 4.4 zu sehen ist. Dieser bildet zusammen mit **Pléiades High Resolution-1A** (PHR1A) ein Erdbeobachtungssatellitenpaar, das das **Centre National d'Études Spatiales** (CNES) zur zivilen und militärischen Nutzung betreibt. Die zwei identisch aussehenden Satelliten bewegen sich auf demselben sonnensynchronen Orbit (Inklination $98,2^\circ$) in einer Höhe von 694 km mit einem Versatz von 180° (vgl. Abb. 4.5). Dadurch wird gewährleistet, dass jedes Gebiet auf der Erde täglich neu erfasst wird, was für den schnellen Bedarf neuer, aktueller Daten von Vorteil ist. Gestartet wurde PHR1B 2012, nachdem sich sein Partner PHR1A bereits ein Jahr im Orbit befand. Ähnlich wie QB2 (vgl. Abschnitt 4.1.1) nimmt auch PHR1B in den vier Standard-Multispektralbändern blue, green, red und Near-IR 1 und dem panchromatischen Kanal auf [ESA 2016a]. Die zugehörigen Wellenlängenbereiche sind Tab. 4.2 zu entnehmen. Dabei liefert der Sensor hochauflösende optische Bilder mit einer geometrischen Auflösung von 70 cm (panchromatisch) und 2,8 m (multispektral) in Nadirrichtung. Der Sensor arbeitet, ebenso wie QB2, als Zeilenscanner [ESA 2016a].

Tabelle 4.2 – Wellenlängenbereich der Spektralbänder des PHR1B Satelliten [ESA 2016a]

#	Spektralband	Wellenlänge in nm
B1	blue	450 - 530
B2	green	510 - 590
B3	red	620 - 700
B4	Near-IR 1	775 - 915
B5	Pan	480 - 820

4.1.3 WorldView-2 Satellit

**Abbildung 4.6** – WV2 Satellit [DigitalGlobe 2015b]

Abb. 4.6 zeigt den WV2 Satelliten, bei dem es sich um einen von DigitalGlobe betriebenen kommerziellen Erdbeobachtungssatelliten handelt. Der optische Sensor bewegt sich seit 2009 auf einer sonnensynchronen, gegenüber dem Äquator um $97,8^\circ$ geneigten, Umlaufbahn in einer Höhe von 770 km um die Erde. Eine Überfliegung desselben Gebiets auf der Erdoberfläche erfolgt durchschnittlich alle 1,1 Tage, was sich aus einer Umlaufzeit um die gesamte Erde von 100,2 Minuten ergibt. Wie in Abb. 4.7 verdeutlicht, hat WV2 einen räumlich hochauflösenden Multispektralsensor an Bord, der in acht verschiedenen Kanälen aufnimmt [ESA 2016c]. Der Wellenlängenbereich für jeden einzelnen Kanal ist in Tab. 4.3 aufgeführt. Dabei werden Multispektralbilder

mit einer Auflösung in Nadirrichtung von 1,8 m und panchromatische Bilder mit einer Auflösung von 46 cm zur Verfügung gestellt, was die derzeit beste Auflösung satellitengetragener Bilddaten darstellt [ESA 2016c]. Im Gegensatz zum QB2 (vgl. Abschnitt 4.1.1) und PHR1B (vgl. Abschnitt 4.1.2) Satelliten, die beide nur in den vier Standard-Multispektralkanälen (blue, green, red und Near-IR 1) aufnehmen, bringen die vier weiteren Kanäle (coastal, yellow, red edge und Near-IR 2) des WV2 Satelliten einige Vorteile mit sich. Zum einen können die in diesem Spektralbereich aufgenommenen Daten beispielsweise bei der Untersuchung von Meeresböden, Feuchtgebieten oder der Wasserqualität in Küstenregionen ihre Anwendung finden. Zum anderen ist es möglich, unterschiedliche Vegetationstypen, Landbedeckungsarten und Pflanzenspecien zu identifizieren und auf Karten abzubilden. Außerdem können verschiedene Getreidearten und der Schädlingsbefall der Vegetation klassifiziert und kartiert werden [ESA 2016c].

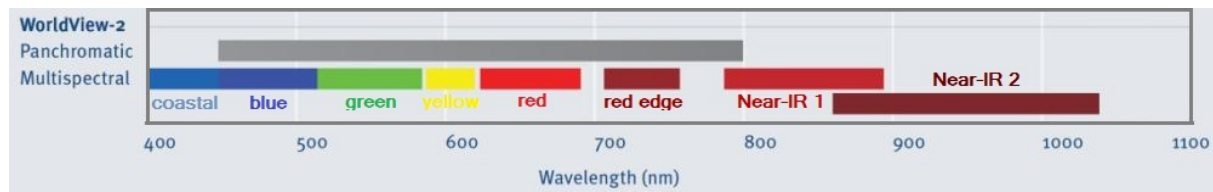


Abbildung 4.7 – Spektralbereich des WV2 Satelliten [Pacifici u. Navulur 2011], abgeändert mit Hilfe von [ESA 2016c]

Tabelle 4.3 – Wellenlängenbereich der Spektralbänder des WV2 Satelliten [ESA 2016c]

#	Spektralband	Wellenlänge in nm
B1	coastal	400 - 450
B2	blue	450 - 510
B3	green	510 - 580
B4	yellow	585 - 625
B5	red	630 - 690
B6	red edge	705 - 745
B7	Near-IR 1	770 - 895
B8	Near-IR 2	860 - 1040
B9	Pan	450 - 800

Ebenso wie bei QB2 und PHR1B erfolgt die Bildaufnahme auch beim WV2 Satelliten mittels einer digitalen CCD Kamera. Der Unterschied liegt allerdings darin, dass Letzterer nicht mit zwei Arrays, sondern mit drei Arrays arbeitet. Neben dem PAN-Array und dem MS-Array 1, das die vier oben genannten Standard-Multispektralkanäle beinhaltet, kommt das dritte Array (MS-Array 2) durch die weiteren vier Kanäle coastal, yellow, red edge und Near-IR 2 zustande. In Abb. 4.8 ist die Anordnung der drei Arrays in der Brennebene des WV2 Sensors dargestellt und zeigt die zeilenweise Erfassung der in Abb. 4.7 aufgeführten neun Kanäle. Das MS-Array 1 ist dabei hinter und das MS-Array 2 vor dem PAN-Array in der Brennebene montiert. Jedes der beiden MS-Arrays besteht aus zehn **Detector Sub-Arrays** (DSAs), wobei sich jedes einzelne der DSAs aus vier parallel angeordneten Detektoren mit jeweils unterschiedlichem Farbfilter zusammensetzt. Das PAN-Array hingegen gliedert sich in 50 DSAs [ESA 2016c]. Die Anordnung der drei verschiedenen Arrays in Abb. 4.8 und der vereinfacht dargestellte Aufbau der CCD Satellitenkamera in Abb. 4.9 verdeutlichen die bi-direktionale Scanmethode des WV2 Sensors. Dieser kann sowohl in Flugrichtung (MS-Array 2) als auch in Nadirrichtung (PAN-Array) und entgegengesetzt zur Bewegung des Satelliten (MS-Array 1) Bilddaten erfassen [Updike u. Comp 2010].

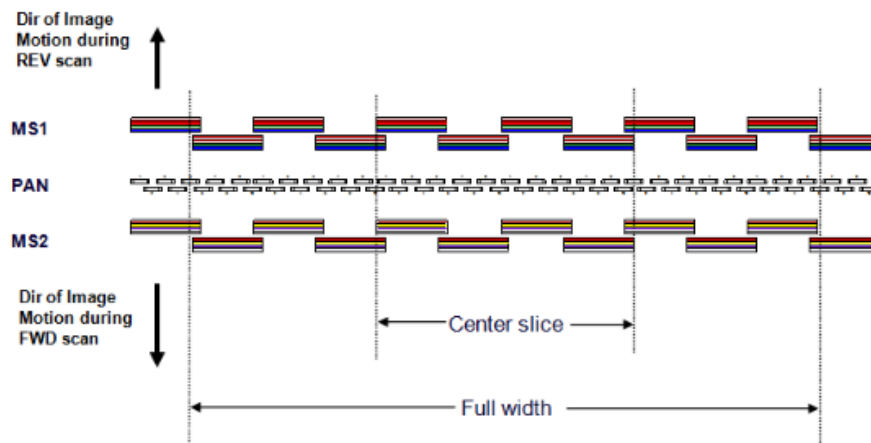


Abbildung 4.8 – Aufbau der Brennebene des WV2 Zeilenscanners [ESA 2016c]

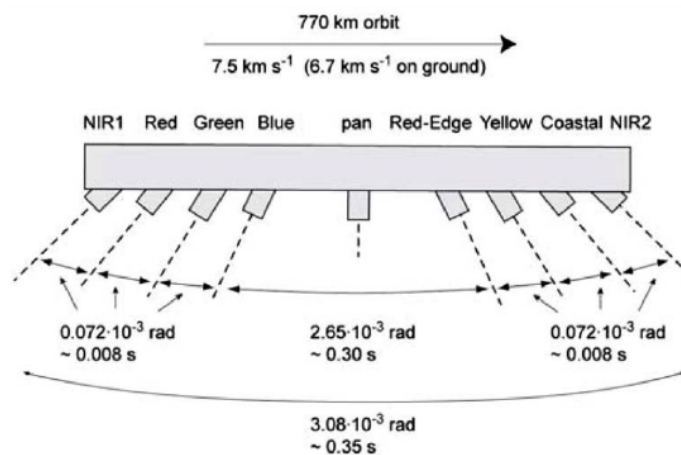


Abbildung 4.9 – Aufbau der WV2 Satellitenkamera [Bräuninger 2013]

4.1.4 Lokalisationsgenauigkeit der optischen Sensoren

Tabelle 4.4 – Horizontale Lokalisationsgenauigkeit der drei optischen Sensoren

	QB2 Sensor	WV2 Sensor	PHR1B Sensor
Circular Error 90 (CE90)	23 m	3,5 m	3 m
Quelle	[Cheng u. a. 2016]	[DigitalGlobe 2016]	[DigitalGlobe 2015a]

Die Lokalisationsgenauigkeit, die sich in der horizontalen Ebene für *Ortho Ready Standard* Produkte der drei optischen Sensoren ergeben, sind in Tab. 4.4 aufgeführt. Die Angabe der Genauigkeit erfolgt dabei über den CE90. In [DigitalGlobe 2016] werden für die Bestimmung der CE90 Maßzahlen der einzelnen Sensoren Passpunkte herangezogen, deren horizontale Lage bekannt ist. Diese werden in das Bild des jeweiligen Sensors projiziert, um anschließend den Sehstrahl des Sensors durch den bestimmten Bildpunkt mit der Ebene zu schneiden, auf der sich der Passpunkt befindet.

Die Abweichung zwischen der eigentlichen Lage des Passpunktes und dem Schnittpunkt des Sehstrahls mit der Ebene liefert einen bestimmten Fehler für das betrachtete Pixel im Bild (vgl. Abb. 4.10). Wird dieser Vorgang für eine Vielzahl von Aufnahmen durchgeführt, können im Anschluss Statistiken aufgestellt werden, die beschreiben, wie genau die Szenen im Mittel projiziert werden. Wie in Abb. 4.11 am Beispiel des WV2 Sensors gezeigt ist, gibt der CE90 an, dass der resultierende Pixelfehler bei 90% der aufgenommenen Szenen innerhalb eines Kreises mit einem Durchmesser von der in Tab. 4.4 angegebenen Maßzahl, in diesem Fall 3,5 m, liegt.

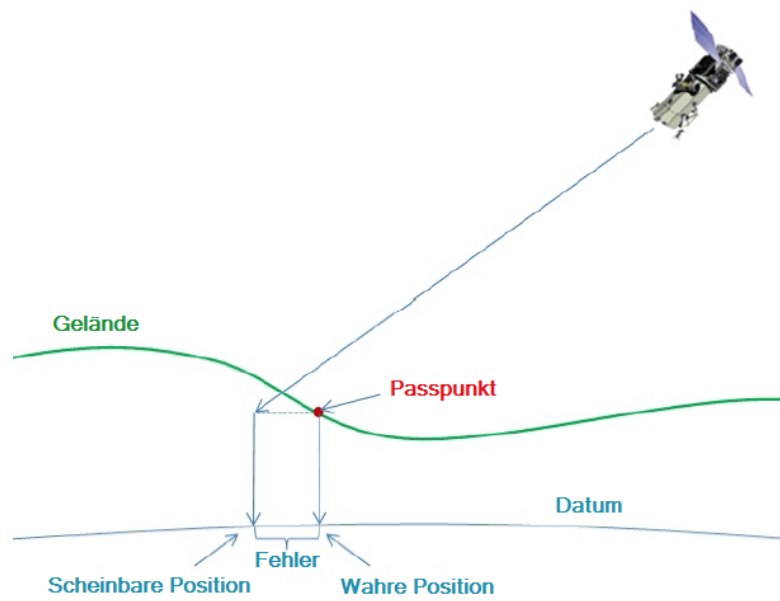


Abbildung 4.10 – Bestimmung des CE90 [DigitalGlobe 2016], abgeändert

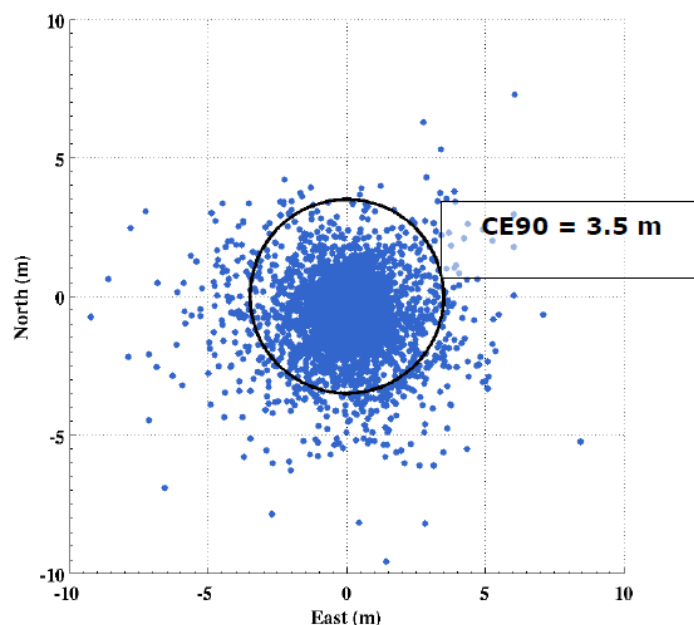


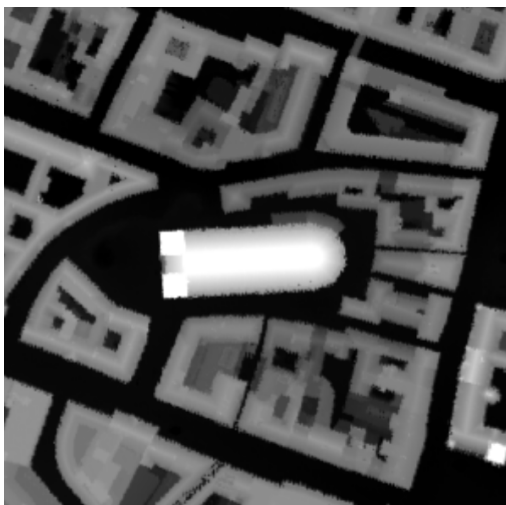
Abbildung 4.11 – Horizontale Lokalisationsgenauigkeit für *Ortho Ready Standard* Produkte des WV2 Sensors [DigitalGlobe 2016]

4.2 Datengrundlage

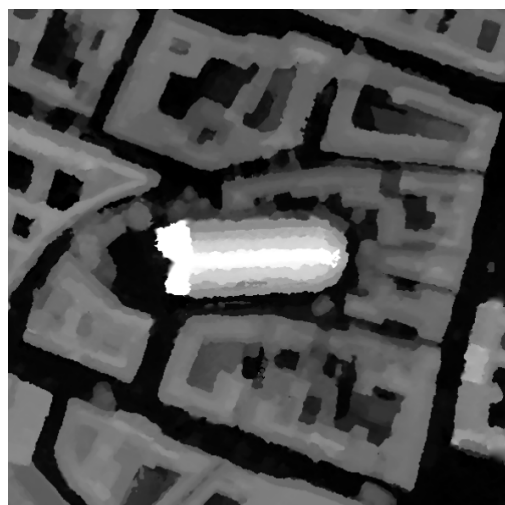
Die zur Verfügung stehenden Datensätze umfassen die Szenen der vier Städte Istanbul, London, München und Dongying (China). Zur Durchführung der Fallstudien werden die Daten von München und Dongying ausgewählt. Diese werden in den nachfolgenden Abschnitten 4.2.1 und 4.2.2 vorgestellt. Alle angegebenen Werte in Tab. 4.5 bis 4.8 sind auf zwei Nachkommastellen gerundet. In Abschnitt 4.2.3 wird auf die Resultate eines Vorverarbeitungsmoduls eingegangen, welches in diese Masterarbeit integriert ist, jedoch in [Ileahag 2016] entwickelt wurde.

4.2.1 Testgebiet München

Im gewählten Testgebiet München liegt für einen Bereich im Zentrum Münchens mit der Frauenkirche als Mittelpunkt ein aus optischen Daten und ein aus LiDAR Daten abgeleitetes DOM vor. Das optische DOM wurde am DLR im IMF in der Abteilung **Photogrammetrie und Bildanalyse** (PBA) mittels des **Semi-Global Matching** (SGM) Algorithmus aus vier panchromatischen WV2 Aufnahmen berechnet. Diesen liegen zwar derselbe Satellitenorbit, jedoch leicht unterschiedliche Einfallswinkel zugrunde. Dahingegen wurde das LiDAR DOM aus flugzeuggetragenen Laserscanning-Daten aus dem Jahr 2003 generiert.



(a) LiDAR DOM der Frauenkirche; $H_{min} = 558,9 \text{ m}$, $H_{max} = 660,1 \text{ m}$



(b) Unbearbeitetes WV2 DOM der Frauenkirche, $H_{min} = 553,9 \text{ m}$; $H_{max} = 659,2 \text{ m}$

Abbildung 4.12 – DOMs des Testgebiets München, vgl. Tab. 4.5

Zur Veranschaulichung sind die DOMs in Abb. 4.12 dargestellt. Es ist leicht zu erkennen, dass das optische DOM (vgl. Abb. 4.12(b)) keine so hohe Genauigkeit aufweist wie das LiDAR DOM in Abb. 4.12(a). Dies ist auf die oben erwähnte unterschiedliche Datengrundlage der beiden DOMs zurückzuführen. Außerdem ist im Gegensatz zu dem auf LiDAR Daten basierenden DOM im optischen DOM Vegetation enthalten. Aufgrund der Tatsache, dass es sich jedoch um das Stadtzentrum von München handelt, ist dort nur vereinzelt Bewuchs vorhanden. Bei den beiden DOMs handelt es

sich um 2,5D Rasterbilder im UTM Koordinatensystem, bei denen für jedes Bildpixel ein Höhenwert vorliegt. Diese Höhenwerte werden als Graustufen angegeben, so dass die Bilder der DOMs nur einen Kanal besitzen. Je heller dabei die Bereiche im 2,5D Bild dargestellt sind, desto höher sind die Höhenwerte an diesen Stellen.

In Tab. 4.5 sind alle wichtigen und für die Simulation notwendigen Metadaten bezüglich des LiDAR und optischen DOMs aufgeführt.

Tabelle 4.5 – Metadaten der DOMs des Testgebiets München, vgl. Abb. 4.12

		LiDAR DOM	Optisches DOM
Allgemeine Informationen	Szene	Frauenkirche	Frauenkirche
	Sensor	—	WV2
	Aufnahmezeit der zugrundeliegenden Daten	April 2003	12.07.2010
Höhen in m	H_{max}	660,10	659,20
	H_{min}	558,90	553,94
Mitte des linken oberen Pixels in UTM Koordinaten in m	$X_{lo,Mo}$	691311,87	691311,75
	$Y_{lo,Mo}$	5335054,84	5335054,25
	$Z_{lo,Mo}$	0,00	0,00
Pixelauflösung in m	$PS_{S,Mo}$	1,00	0,50
	$PS_{Z,Mo}$	1,00	0,50
	$PS_{H,Mo}$	0,10	1,00
Modellgröße in px	$N_{Z,Mo}$	294	589
	$N_{S,Mo}$	300	600

Wie zu Beginn von Abschnitt 3.2 bereits erwähnt, geht neben dem DOM als zweiter Input ein hochauflösendes optisches Satellitenbild in die Simulationsumgebung ein. Bei hochauflösenden optischen Satellitenaufnahmen kann dabei allgemein zwischen drei verschiedenen Bildarten unterschieden werden:

- Level 1B Bild:

Liegt ein Bild als Level 1B Bild vor, so ist das Bild nicht bearbeitet, sondern ist in Originalgeometrie vorhanden. Die Bildinhalte werden in geographischen Koordinaten beschrieben.

- Level 2 Bild:

Das Level 2 Bild einer Szene ist bereits durch eine Projektion des Bildes auf eine Ebene mit einer bestimmten Höhe vorverarbeitet (WGS84), wodurch perspektivische Verzerrungen am Bildrand auftreten. Außerdem ist das Level 2 Bild eingeordnet und das zugrundeliegende Koordinatensystem enthält UTM Koordinaten.

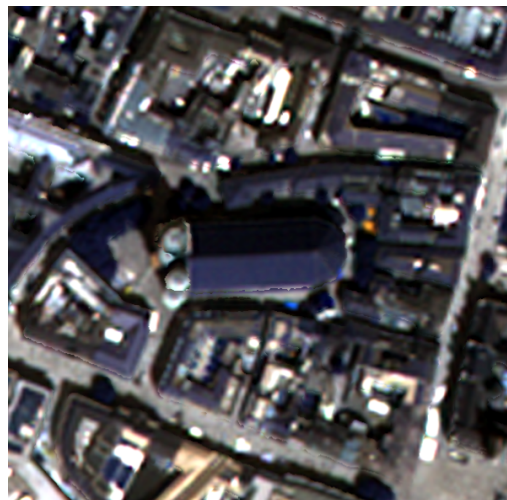
- Orthophoto:

Bei digitalen Orthophotos handelt es sich um eingenordete, entzerrte Bilder mit einem einheitlichen Bildmaßstab und lagerichtiger Abbildung. Die Orthorektifizierung des Bildes wird mit Hilfe eines DGMs durchgeführt, so dass auch in den Randbereichen des Bildes keine perspektivischen Verzerrungen mehr auftreten.

Für diese Masterarbeit wird ein einkanaliges panchromatisches Level 2 Satellitenbild verwendet, das am 12.07.2010 vormittags vom WV2 Sensor aufgenommen wurde und das gesamte Stadtgebiet von München abbildet. Das Level 2 Bild stellt eines der vier panchromatischen WV2 Bilder dar, die zur Berechnung des DOMs in Abb. 4.12(b) verwendet wurden. Demnach basieren die beiden Eingabedaten auf derselben Datengrundlage. Zur visuellen Darstellung ist in Abb. 4.13(a) der Teil aus dem panchromatischen Satellitenbild von München ausgeschnitten, der sich mit den vorhandenen DOMs in Abb. 4.12 überlagert.



(a) Panchromatisches Level 2 Bild der Frauenkirche



(b) Multispektrales Orthophoto der Frauenkirche

Abbildung 4.13 – Optische WV2 Bilder des Testgebiets München, vgl. Tab. 4.6

Die wesentlichen Bildmetadaten des panchromatischen Satellitenbildes sind in Tab. 4.6 als Übersicht aufgelistet. Dabei sind die meisten vorkommenden Parameter direkt aus der XDibias *_aux* Bilddatei zu entnehmen. Eine Ausnahme bildet jedoch die Referenzhöhe des Satellitenbildes H_{ref} , der Blickwinkel β und der Einfallswinkel der Sensorstrahlen am Boden θ_{Bo} . Wie oben bereits erwähnt wird ein Level 2 Bild auf eine Ebene, die eine bestimmte Höhe besitzt, projiziert. Die Information zur gewählten Referenzhöhe muss vom jeweiligen Erzeuger des Level 2 Bildes eingeholt werden. Im Falle des panchromatischen Satellitenbildes von München dient die Abteilung PBA am IMF des DLR in Oberpfaffenhofen als Informationsquelle. Dem Level 2 Bild liegt als Referenzhöhe $H_{ref} = 600 \text{ m}$ (WGS84) zugrunde. Wie in Abschnitt 3.2.2 detailliert beschrieben, können die in den Metadaten fehlenden, für die Simulation jedoch unabdingbaren, Winkel β und θ_{Bo} aus den zur Verfügung stehenden RPCs berechnet werden.

Der Vollständigkeit halber sind in Tab. 4.6 zusätzlich die Metadaten des in Abb. 4.13(b) dargestellten Orthophotos der Frauenkirche aufgeführt. Dieses ist mittels des WV2 Sensors erfasst worden, wonach acht Multispektralkanäle zugrunde liegen (vgl. Abschnitt 4.1.3). Diese werden dazu genutzt, die Vegetation nach dem in [Ilehag 2016] entwickelten Verfahren aus dem in Abb. 4.12(b) gezeigten optischen DOM zu eliminieren. Da das Orthophoto lediglich zur Vorverarbeitung des DOMs genutzt wird, sind nicht alle in Tab. 4.6 aufgeführten Metadaten erforderlich. [Ilehag 2016] beschreibt als Grundvoraussetzung für die Vorverarbeitung des optischen WV2 DOMs eine gleiche geometrische Auflösung des zu vorverarbeitenden DOMs und der Multispektralaufnahme. Wie Tab. 4.5 und 4.6 zu entnehmen ist, liegen das optische DOM und das zugehörige Orthophoto der Szene in derselben räumlichen Auflösung vor, so dass keine Umrechnung mehr notwendig ist.

Tabelle 4.6 – Metadaten der optischen Satellitenbilder des Testgebiets München, vgl. Abb. 4.13

		Level 2 Bild	Orthophoto
Allgemeine Informationen	Szene	München	Frauenkirche
	Sensor	WV2	WV2
	Kanal	PAN (1 Kanal)	MS (8 Kanäle)
	Aufnahmezeit	12.07.2010, 10:29:57.00 Uhr	12.07.2010, 10:30:16.00 Uhr
	H_{ref} in m	600 (WGS84)	—
	UTM Zone	32	32
	RPCs	vorhanden	—
Mitte des linken oberen Pixels in UTM Koordinaten in m	$X_{lo,Opt}$	675900,25	691311,75
	$Y_{lo,Opt}$	5346535,75	5335054,25
	$Z_{lo,Opt}$	0,00	0,00
Pixelauflösung in m	$PS_{S,Opt}$	0,50	0,50
	$PS_{Z,Opt}$	0,50	0,50
Bildgröße in px	$N_{Z,Opt}$	39960	589
	$N_{S,Opt}$	32823	600
Aufnahmewinkel in °	α_{Se}	189,00	—
	β	15,08	—
	θ_{Se}	14,50	—
	θ_{Bo}	15,96	—
Sonnenposition in °	α_{So}	154,70	—
	ε_{So}	62,10	—

4.2.2 Testgebiet Dongying

Neben der ausgewählten Szene in München (Frauenkirche) wird die chinesische Stadt Dongying als zweite Testszene herangezogen. Diese befindet sich in der chinesischen Provinz Shandong, die im Osten Chinas am Gelben Meer liegt [Leichtle u. a. 2016]. Die von *Airbus Defence and Space* gelieferten Rohdaten der Szene Dongying stellt das **Deutsche Fernerkundungsdatenzentrum** (DFD) des DLR zur Verfügung. Die Rohdaten enthalten drei panchromatische Aufnahmen des PHR1B Sensors vom 18.10.2013, aus welchen wiederum vom IMF-PBA (DLR) ein optisches DOM mit einer Auflösung von 0,7 m berechnet wurde. Ziel ist, dass hinter der Berechnung der DOMs von München und Dongying dieselbe Methodik steckt und damit eine auf gleichen Algorithmen, aber unterschiedlichen Aufnahmesensoren (WV2 und PHR1B) basierende Datengrundlage vorhanden ist. Zur Einsparung von Rechenzeit und zur besseren Veranschaulichung wird ein Teil des DOMs von Dongying aus dem gesamten Bereich ausgeschnitten und als Modell für die Simulationen verwendet (vgl. Abb. 4.14). Im Gegensatz zu den vorliegenden DOMs der Frauenkirche in München (vgl. Abb. 4.12) stellt das DOM von Dongying für die Simulation von Gebäuden eine weitaus schlechtere Datengrundlage dar. Grund hierfür ist, dass nicht nur erhabene Gebäude im DOM Höhenwerte aufweisen, sondern auch Bereiche, die für eine Simulation in Hinblick auf die Erfassung von Gebäuden nicht relevant sind. Dies ist beispielsweise an der Wasserfläche in der Mitte der Szene oder im linken oberen Häuserblock zu erkennen. Die grauen Einfärbungen, die neben jenen der erhabenen Gebäude existieren, deuten auf Höhenwerte hin, die fälschlicherweise in die Simulation mit eingehen und das Simulationsergebnis an diesen Stellen beeinträchtigen. Die zum DOM in Abb. 4.14 zugehörigen Metadaten sind Tab. 4.7 zu entnehmen.

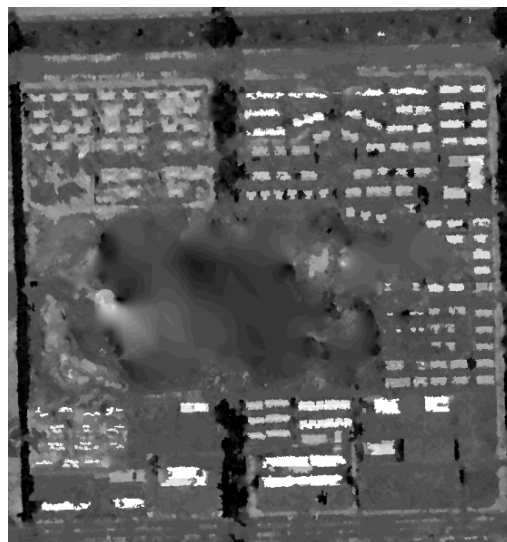


Abbildung 4.14 – Unbearbeitetes PHR1B DOM des Testgebiets Dongying; $H_{min} = -11$ m, $H_{max} = 62$ m, vgl. Tab. 4.7

Tabelle 4.7 – Metadaten des DOMs des Testgebiets Dongying, vgl. Abb. 4.14

		Optisches DOM
Allgemeine Informationen	Szene	Dongying
	Sensor	PHR1B
	Aufnahmezeit der zugrundeliegenden Daten	18.10.2013
Höhen in m	H_{max}	62,00
	H_{min}	-11,00
Mitte des linken oberen Pixels in UTM Koordinaten in m	$X_{lo,Mo}$	648902,45
	$Y_{lo,Mo}$	4145274,35
	$Z_{lo,Mo}$	0,00
Pixelauflösung in m	$PS_{S,Mo}$	0,70
	$PS_{Z,Mo}$	0,70
	$PS_{H,Mo}$	1,00
Modellgröße in px	$N_{Z,Mo}$	1594
	$N_{S,Mo}$	1490

Zudem stehen auch für die Region Dongying hochauflösende optische Satellitenaufnahmen als Simulationsgrundlage bereit. Im Vergleich zu den optischen Bilddaten von München aus Abschnitt 4.2.1 liegen hier jedoch drei Aufnahmen vor, denen jeweils ein unterschiedlicher optischer Sensor zugrunde liegt. Zum einen wird eine der drei originalen panchromatischen Aufnahmen, welche für die Berechnung des DOMs herangezogen wurden, verwendet. Diese wird am IMF-PBA (DLR) auf eine Ebene mit der Referenzhöhe $H_{ref} = 0$ m orthorektifiziert, so dass, genauso wie für das Testgebiet München, ein Level 2 Bild vorliegt. Grund für die Wahl von $H_{ref} = 0$ m ist die Tatsache, dass es sich bei Dongying um eine Küstenregion am Gelben Meer handelt. Zum anderen liegt sowohl eine WV2 Multispektralaufnahme vom 17.01.2013 als auch ein etwa sechs Jahre früher erfasstes (am 25.02.2007) Multispektralbild des QB2 Sensors vor. Beide Aufnahmen werden bereits als Level 2 Bilder mit einer Referenzhöhe H_{ref} von 1,62 m (QB2) und 2,64 m (WV2) vom DFD (DLR) zur Verfügung gestellt. Die drei optischen Satellitenbilder sind in Abb. 4.15(a) bis 4.15(c) in chronologischer Reihenfolge visualisiert. Durch den zeitlichen Versatz der Aufnahmen ist die Dynamik des Zubaus der chinesischen Stadt gut zu erkennen. Neben einer eher geringeren Bebauungsdichte zum Zeitpunkt der QB2 Aufnahme ist sechs Jahre später im WV2 Bild eine dicht besiedelte Region abgebildet. Der Unterschied zwischen dem PHR1B Bild und der neun Monate älteren WV2 Aufnahme ist aufgrund der kürzeren Zeitspanne nicht so stark wie zwischen der QB2 und WV2 Aufnahme. An einigen Stellen ist jedoch zu erkennen, dass einzelne Gebäude während der neun Monate entweder abgerissen oder fertiggestellt wurden. Somit stimmen die panchromatische PHR1B Aufnahme und das WV2 Multispektralbild auch nicht ausnahmslos überein. Wegen des offensichtlich

regen Wachstums innerhalb des ausgewählten Bereichs von Dongying stellen die drei Aufnahmen eine gute Bilddatengrundlage für Veränderungsanalysen dar.



(a) Multispektrales QB2 Bild vom 25.02.2007



(b) Multispektrales WV2 Bild vom 17.01.2013



(c) Panchromatisches PHR1B Bild vom 18.10.2013

Abbildung 4.15 – Optische Level 2 Bilder des Testgebiets Dongying [Leichtle 2016], vgl. Tab. 4.8

Außerdem ist in Abb. 4.15 zu erkennen, dass die QB2 und WV2 Aufnahme in vier Kanälen vorliegen, wohingegen jene des PHR1B Sensors lediglich als panchromatisches Bild zur Verfügung steht. Damit kann eine Filterung der Vegetation nach dem Prinzip in [Illehag 2016] lediglich anhand des QB2 oder WV2 Bildes erfolgen. Da die räumlichen Auflösungen der Multispektralaufnahmen und des DOMs nicht zusammenpassen, muss die Auflösung des QB2 Bildes (0,6 m) und der WV2 Aufnahme (0,5 m) an jene des optischen DOMs (0,7 m) angepasst werden. Die Neuprojektion der Aufnahmen wird mittels des Programms *gdalwarp* durchgeführt. Dieses ist Bestandteil der **Geospatial Data Abstraction Library (GDAL)**, die eine Open-Source-Programmbibliothek zur Kon-

vertierung raumbezogener Raster- und Vektordatenformate darstellt [Doxygen 2016]. Somit liegen zur Vorverarbeitung des optischen DOMs die beiden Multispektralaufnahmen des QB2 und WV2 Sensors in derselben Auflösung wie das DOM vor (0,7 m). Für die eigentliche Simulation werden jedoch die Satellitenbilder mit ihren originalen Auflösungen herangezogen.

Die Metadaten der drei Satellitenbilder von Dongying sind in Tab. 4.8 aufgeführt. Falls nach Transformation der Bilddaten ins notwendige XDibias Format nicht alle für die Simulation erforderlichen Metadaten in der *_aux* Datei enthalten sind, können diese anhand der in Tab. 4.8 angegebenen Quellen ergänzt werden. Hierbei handelt es sich um Onlinekataloge der jeweiligen Satellitenbetreiber, in denen über die Bild-ID sämtliche Bildinformationen zur Verfügung gestellt sind.

Tabelle 4.8 – Metadaten der optischen Satellitenbilder des Testgebiets Dongying, teilweise entnommen aus [Leichtle u. a. 2016], vgl. Abb. 4.15

		Level 2 Bilder		
Allgemeine Informationen	Szene	Dongying	Dongying	Dongying
	Sensor	QB2	WV2	PHR1B
	Kanal	MS (4 Kanäle)	MS (4 Kanäle)	PAN (1 Kanal)
	Aufnahmezeit	25.02.2007, 15:15:48.08 Uhr	17.01.2013, 15:32:34.44 Uhr	18.10.2013, 15:00:15.50 Uhr
	H_{ref} in m	1,62	2,49	0
	UTM Zone	50	50	50
	RPCs	vorhanden	vorhanden	vorhanden
Mitte des linken oberen Pixels in UTM Koordinaten in m	$X_{lo,Opt}$	637658,70	634476,25	638893,49
	$Y_{lo,Opt}$	4153005,9	4164131,75	4152781,43
	$Z_{lo,Opt}$	0,00	0,00	—
Pixelauflösung in m	$PS_{S,Opt}$	0,60	0,50	0,70
	$PS_{Z,Opt}$	0,60	0,50	0,70
Bildgröße in px	$N_{Z,Opt}$	24007	63490	22239
	$N_{S,Opt}$	29118	35704	24621
Aufnahmewinkel in °	α_{Se}	346,78	150,69	180,06
	β	167,54	-30,32	20,02
	θ_{Se}	14,2	22,5	19,60
	θ_{Bo}	15,52	25,60	19,61
Sonnenposition in °	α_{So}	159,24	168,27	163,27
	ε_{So}	41,22	31,12	41,64
Datenquelle		[EUSI 2016]	[EUSI 2016]	[Airbus 2016]

Wie aufgezeigt, stehen für die Simulation verschiedene DOMs unterschiedlicher Szenarien zur Verfügung, die auf demselben Berechnungsalgorithmus, jedoch auf differierenden optischen Sensoren basieren. Außerdem existiert eine breite Grundlage von verschiedenartigem, hochauflösendem optischen Bildmaterial. Die Datengrundlage des Testgebiets München wird dabei zur Darstellung und Erläuterung der aus GeoRayOpt resultierenden Simulationsergebnisse verwendet (vgl. Abschnitt 5.1 und 5.2). Das zweite Testgebiet Dongying dient vorwiegend dazu, die Anwendungsmöglichkeiten der Simulationen deutlich zu machen (vgl. Abschnitt 5.3). Beide Szenarien werden sowohl zur Diskussion und Bewertung der simulierten Resultate (vgl. Abschnitt 5.4) als auch zur Erarbeitung möglicher Anknüpfungspunkte an diese Masterarbeit herangezogen (vgl. Kapitel 6).

4.2.3 Vorprozessierung der Daten

Wie in Abschnitt 4.2.1 und 4.2.2 bereits erwähnt, werden die darin beschriebenen optischen DOMs der beiden Testgebiete vorprozessiert, indem Vegetation und Rauschen eliminiert wird. Außerdem wird sowohl für das LiDAR als auch für die optischen DOMs ein DGM und nDOM abgeleitet. Wie in Abb. 4.16 veranschaulicht, stellt ein DOM im Allgemeinen die Erdoberfläche samt allen darauf befindlichen Objekten, wie zum Beispiel Gebäude oder Vegetation, dar. Das DGM repräsentiert lediglich die Erdoberfläche der Szene und das nDOM beinhaltet alle Objekte des DOMs, die sich über der Erdoberfläche befinden.

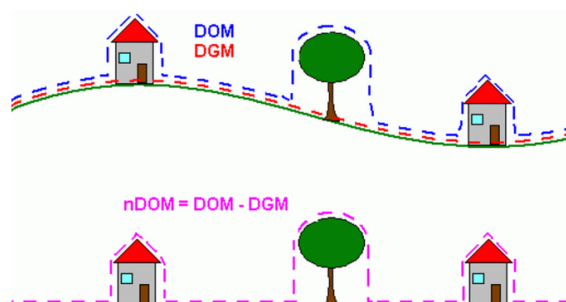
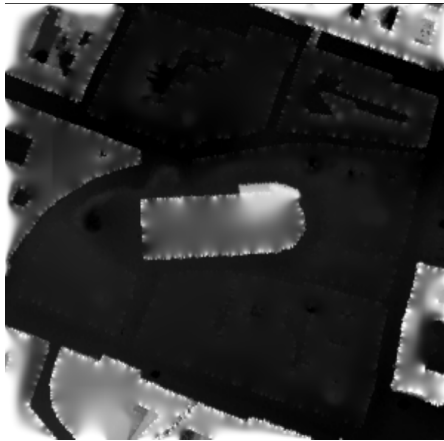


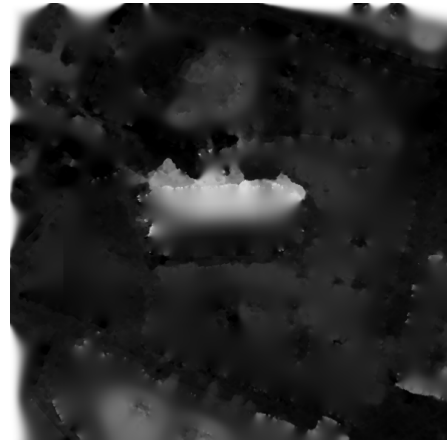
Abbildung 4.16 – Drei digitale Modelle: DOM (blau), DGM (rot) und nDOM (magenta) [Poznanska 2013]

Das Verfahren zur Anwendung dieser vorprozessierenden Schritte wurde im Rahmen von [Ilehag 2016] entwickelt. Da die Vorprozessierung für die Durchführung der Machbarkeitsstudie und Szeneninterpretation in der vorliegenden Masterarbeit jedoch essentiell ist, wird das in [Ilehag 2016] erarbeitete Verfahren in die vollautomatische Simulationsumgebung integriert. Die Methodik der Vorverarbeitung wird nicht im Zuge der vorliegenden Masterarbeit entwickelt, sondern findet nur Anwendung. Aus diesem Grund wird in diesem Abschnitt lediglich auf das Ergebnis der Vorprozessierung eingegangen, für die Beschreibung des eigentlichen Verfahrens sei auf den Anhang verwiesen.

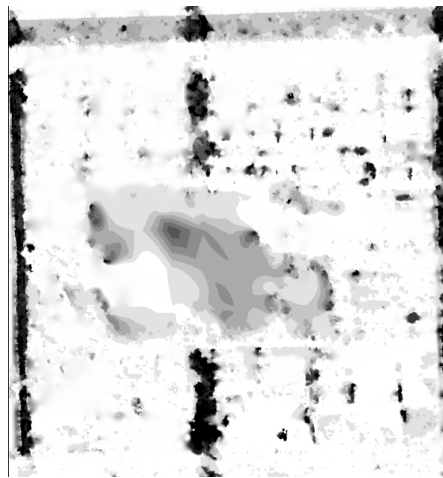
Durch Integration der Vorprozessierungsschritte wird zunächst, ausgehend vom jeweiligen DOM (LiDAR oder optisch), ein DGM berechnet. Die erstellten DGMs der beiden Testgebiete München und Dongying werden in Abb. 4.17(a) bis 4.17(c) dargestellt.



(a) LiDAR DGM der Frauenkirche; $H_{min} = 558,9 \text{ m}$, $H_{max} = 579,9 \text{ m}$



(b) WV2 DGM der Frauenkirche; $H_{min} = 553,9 \text{ m}$, $H_{max} = 580,8 \text{ m}$



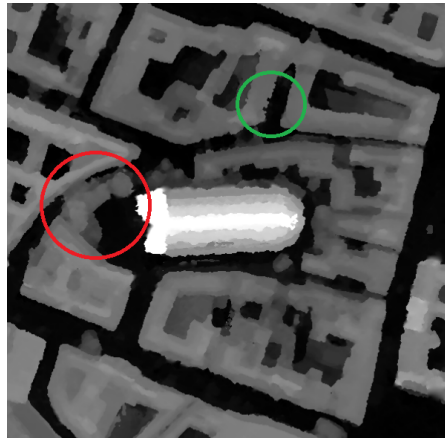
(c) PHR1B DGM von Dongying; $H_{min} = -11 \text{ m}$, $H_{max} = 7 \text{ m}$

Abbildung 4.17 – DGMs der beiden Testgebiete

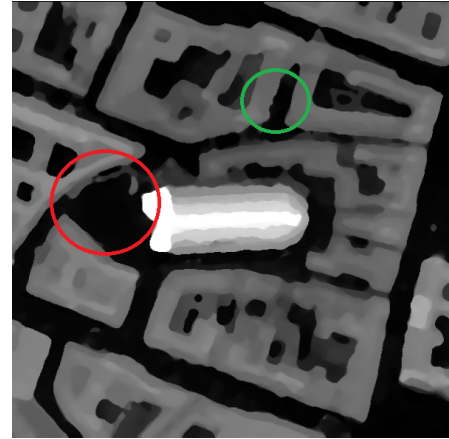
Die DGMs der beiden Testgebiete (vgl. Abb. 4.17) weisen einige Ausreißer und Unebenheiten auf. Würden diese DGMs simuliert werden und zur Erstellung der Binärmasken in Abschnitt 5.2 herangezogen werden, wäre die aufgeraute Gebäudeumgebung in den Resultaten enthalten und würde die visuelle Bildanalyse negativ beeinflussen. Um einen möglichst einheitlichen und klar simulierten Hintergrund zu erhalten, muss die aufgeraute Gebäudeumgebung der Szene ausgeschaltet werden. Dafür wird eine ebene Fläche erstellt, welche die mittlere Höhe des DGMs als konstante Höhe besitzt und dieselbe Größe wie das DOM aufweist. Für das auf LiDAR Daten basierende DGM der Frauenkirche ergibt sich dabei eine Ebene mit einer konstanten Höhe von 562,5 m. Für das DGM basierend auf WV2 Daten resultiert eine Ebene, die in 563 m Höhe gelagert ist. Die planare Fläche, die sich für Dongying ergibt, liegt in einer konstanten mittleren DGM Höhe von 5 m. Folglich werden anstatt der DGMs in Abb. 4.17 die erzeugten Ebenen simuliert und anschließend für die Generierung der Binärbildmasken herangezogen. Die DGMs stellen Zwischenergebnisse dar, die lediglich zur Ermittlung der nDOMs verwendet werden.

Im Anschluss kann optional eine Elimination der Vegetation aus dem DOM durchgeführt werden. Dafür muss über eine entsprechende Parametereinstellung zu Beginn der vollautomatischen Prozessierungskette das Filtermodul von [Ilehag 2016] aktiviert oder deaktiviert werden. Handelt es sich bei dem DOM um ein bereits gefiltertes, rauschfreies DOM wird auf die Filterung verzichtet. Im vorliegenden Fall wird daher für das auf LiDAR Daten basierende DOM in Abb. 4.12(a) eine Deaktivierung des Moduls vorgenommen. Liegt jedoch ein verrauschtes DOM mit Vegetation als Input vor, wird das Modul zur Vorbereitung des DOMs für die Simulation angewendet. Demnach erfolgt im Falle eines optischen DOMs (vgl. Abb. 4.12(b) und 4.14) die Aktivierung der Filterung. Für das optische DOM der Frauenkirche wird das zur Verfügung stehende Orthophoto in Abb. 4.13(b) zur Filterung herangezogen. Wie in Tab. 4.5 und 4.6 aufgeführt, liegen sowohl dem Orthophoto als auch dem zu vorverarbeitenden DOM derselbe optische Sensor zugrunde. Somit gehen in beide Daten dieselben Lokalisationsungenauigkeiten ein, wodurch die Vegetation anhand der Multispektraldaten optimal detektiert werden kann. Für die Filterung des DOMs des zweiten Testgebiets Dongying wäre daher eine multispektrale PHR1B Aufnahme von Vorteil, da, wie im Falle der Frauenkirche, beide Datensätze damit auf derselben Datenquelle beruhen würden (vgl. Tab. 4.7 und 4.8). Da dem DFD am DLR jedoch nur multispektrale Aufnahmen des QB2 und WV2 Sensors für Dongying zur Verfügung stehen, wird zur Filterung des PHR1B DOMs die vier-kanalige Aufnahme des Sensors verwendet, dessen Lokalisationsgenauigkeit nahe an der des PHR1B Sensors liegt. Nach Tab. 4.4 handelt es sich hierbei um den WV2 Sensor. Unabhängig von der Simulationsgrundlage (QB2, WV2 oder PHR1B Bilddaten) wird die multispektrale WV2 Aufnahme mit einer Auflösung von 0,7 m (vgl. Abschnitt 4.2.2) zur Filterung des DOMs von Dongying herangezogen.

Zur Veranschaulichung ist in Abb. 4.18 unter anderem ein Vergleich zwischen dem unbearbeiteten (vgl. Abb. 4.18(a)) und dem vorverarbeiteten (vgl. Abb. 4.18(b)) optischen DOM der Frauenkirche zu sehen. Dabei ist im rot markierten Kreis eine Elimination von Bäumen, die mit Hilfe des panchromatischen Satellitenbildes in Abb. 4.13(a) der Szene als solche identifiziert werden können, zu erkennen. Der grün umkreiste Bereich stellt ein Beispiel für eine weitaus glattere Darstellung der Kanten nach Anwendung des Filtermoduls dar. Dieser Glättungseffekt kann auch im vorverarbeiteten DOM von Dongying beobachtet werden (vgl. grüner Kreis in Abb. 4.18(c) und 4.18(d)). Eine Elimination der Vegetation ist für das optische PHR1B DOM von Dongying nur an vereinzelten Stellen durchgeführt worden, so dass dies in Abb. 4.18(d) nicht sofort sichtbar ist. Dies liegt daran, dass die multispektrale Aufnahme des WV2 Sensors, die zur Detektion der Vegetation im DOM verwendet wird, im Winter aufgenommen ist (17.01.2013). Aufgrund dieser Tatsache ist die Vegetation in der Multispektralaufnahme nur karg ausgeprägt. Folglich werden bei der Vorverarbeitung keine Bereiche lokalisiert, für die im DOM eine Filterung des Bewuchses durchgeführt werden soll. Da die dem DOM zugrundeliegenden PHR1B Aufnahmen jedoch am 18.10.2013 erfasst wurden, ist durchaus Vegetation im DOM enthalten. Die entlang der Straßen aufgereihten Büsche und Sträucher (vgl. gelb markierte Bereiche in Abb. 4.18(c) und 4.18(d)) bleiben im DOM erhalten, was sich auch in den Simulationsergebnissen aus dem GeoRayOpt Simulator widerspiegeln wird.



(a) Unbearbeitetes WV2 DOM der Frauenkirche; $H_{min} = 553,9 \text{ m}$, $H_{max} = 659,2 \text{ m}$



(b) Vorverarbeitetes WV2 DOM der Frauenkirche; $H_{min} = 559,9 \text{ m}$, $H_{max} = 657,8 \text{ m}$



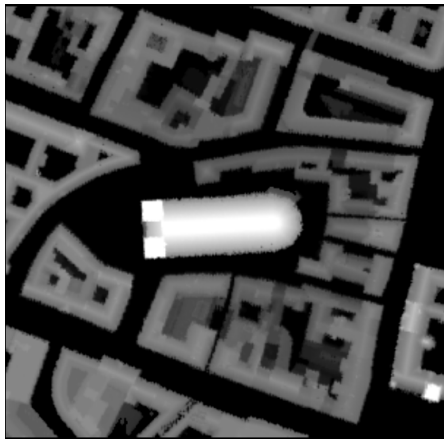
(c) Unbearbeitetes PHR1B DOM von Dongying; $H_{min} = -11 \text{ m}$, $H_{max} = 62 \text{ m}$



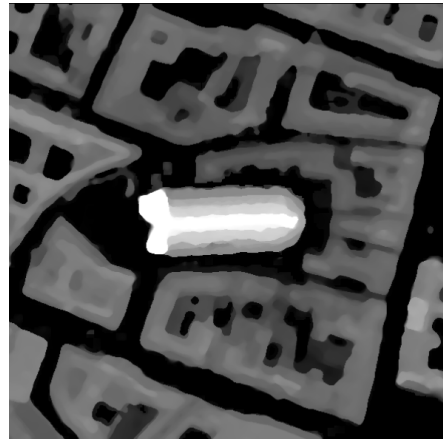
(d) Vorverarbeitetes PHR1B DOM von Dongying; $H_{min} = -9 \text{ m}$, $H_{max} = 61 \text{ m}$

Abbildung 4.18 – Vorverarbeitung der DOMs der beiden Testgebiete

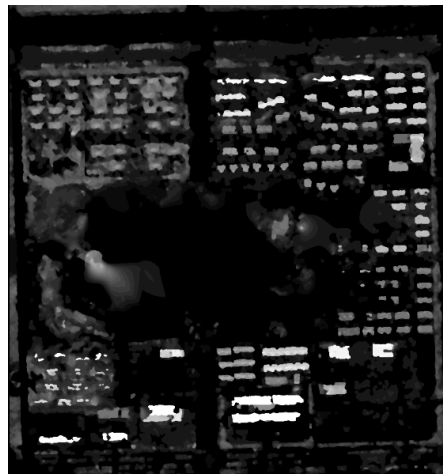
Wie in Abb. 4.16 veranschaulicht, kann ein nDOM durch Subtraktion des DGMs vom jeweiligen DOM berechnet werden. Ist die Anwendung des Filtermoduls von [Ilehag 2016] aktiviert, werden am erzeugten nDOM Nachbearbeitungen vorgenommen, die im Anhang genauer beschrieben sind. Wird das Filtermodul jedoch nicht angewendet, resultiert das nDOM direkt aus der Differenzbildung von DOM und DGM. Der Vollständigkeit halber sind die erzeugten nDOMs in Abb. 4.19 aufgeführt. Für das Resultat in Abb. 4.19(a) erfolgt eine Subtraktion des in Abb. 4.17(a) dargestellten DGMs von dem in Abb. 4.12(a) gezeigten DOM. Für die Berechnung des optischen WV2 nDOMs in Abb. 4.19(b) wird das DGM, das in Abb. 4.17(b) veranschaulicht ist, von dem vorverarbeiteten DOM aus Abb. 4.18(b) abgezogen. Das nDOM von Dongying ergibt sich aus der Differenz zwischen dem in Abb. 4.18(d) abgebildeten gefilterten DOM und dem in Abb. 4.17(c) gezeigten DGM.



(a) LiDAR nDOM der Frauenkirche;
 $H_{min} = 560,1 \text{ m}$, $H_{max} = 660,1 \text{ m}$



(b) Vorverarbeitets WV2 nDOM der Frauenkirche; $H_{min} = 560,3 \text{ m}$, $H_{max} = 657,8 \text{ m}$



(c) Vorverarbeitetes PHR1B nDOM von Dongying; $H_{min} = -8 \text{ m}$, $H_{max} = 61 \text{ m}$

Abbildung 4.19 – nDOMs der beiden Testgebiete

Aufgrund der Tatsache, dass sowohl das DGM als auch das nDOM aus dem DOM erzeugt werden, wird jeder im DOM existierende Fehler propagiert. Je präziser und hochauflösender das DOM damit ist, desto qualitativ hochwertigere DGMs und nDOMs können erstellt werden. Die nicht eliminierten Vegetationsbereiche im DOM, die in Abb. 4.18(d) gelb markiert sind, sind folglich auch im abgeleiteten nDOM enthalten (vgl. Abb. 4.19(c)). Zudem sind im linken oberen Häuserblock des nDOMs von Dongying Höhenwerte zwischen den einzelnen Gebäuden zu erkennen. Beim Vergleich mit einer der vier dem DOM zugrundeliegenden panchromatischen Aufnahmen in Abb. 4.15(c) lässt sich an diesen Stellen Vegetation erkennen, die bei der Vorverarbeitung nicht eliminiert wird.

Nach Anwendung des in [Ileahag 2016] entwickelten Vorprozessierungsmoduls stehen zusätzlich zu den in Abschnitt 4.2.1 und 4.2.2 erläuterten Datensätzen die DGMs, nDOMs und die vorprozessierten DOMs der beiden Testgebiete als Eingangsdaten für den Simulator GeoRayOpt zur Verfügung. Basierend auf diesen Datensätzen werden in nachfolgendem Kapitel 5 Simulationen durchgeführt und die Ergebnisse erläutert.

Kapitel 5

Szenariobasierte Fallstudien

Für die Durchführung einer szenariobasierten Fallstudie wird die Szene der Frauenkirche in München herangezogen. Die aus GeoRayOpt resultierenden Simulationsergebnisse werden aufgezeigt und erläutert. Auf Grundlage der simulierten Resultate erfolgt daraufhin die Erstellung von Bildmasken zur Interpretation der Szene in München. Für die Szene Dongying werden nur einzelne repräsentative Simulationsergebnisse präsentiert, da das Augenmerk bei diesem Testgebiet vorwiegend auf der Darstellung der Verbesserung von Veränderungsanalysen liegt. Im Anschluss an die Erläuterung der Simulationsergebnisse werden diese diskutiert.

5.1 Simulationen am Beispiel des Testgebiets München

In Tab. 5.1 sind die Einstellungen der in Abschnitt 3.2.3 erklärten Parameter bezüglich des Reflexionsverhaltens von Objektoberflächen bei der Simulation aufgeführt. Da die spiegelnden Reflexionsanteile bei einem nur geringen Einfallswinkel der Sensorstrahlen dazu führen, dass fast die gesamte Signalstärke zum Sensor reflektiert wird und dies für die Simulation irritierend wirken würde, wird diese Art von Reflexion für die Simulationen nicht berücksichtigt und auf Null gesetzt ('specular' = 0). Auch die beiden Parameter 'reflection' und 'ambient' werden nicht berücksichtigt. Vielmehr liegt das Augenmerk auf der diffusen Reflexionskomponente, die der in Realität vorkommenden Streuung näher kommt. Je größer der diffuse Anteil gewählt wird, desto heller erscheint das Objekt im simulierten Bild. Für die Durchführung der Simulationen wird eine diffuse Reflexionskomponente von 0,7 verwendet.

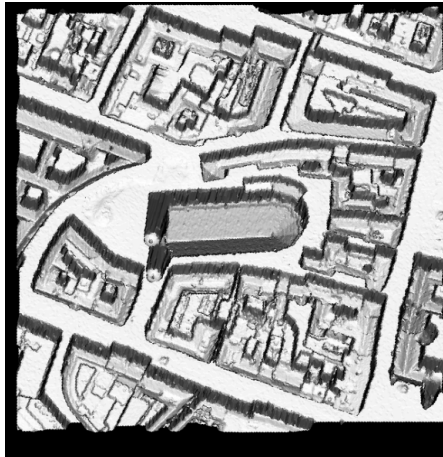
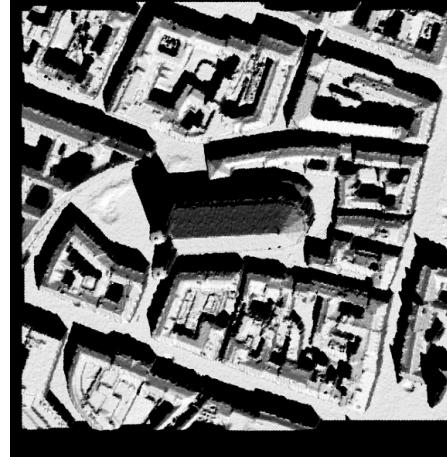
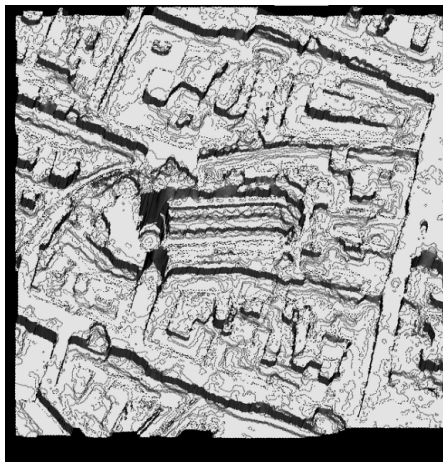
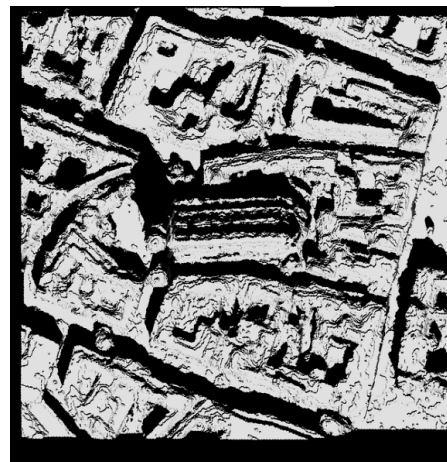
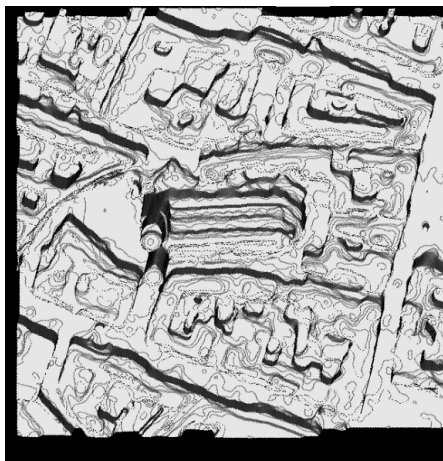
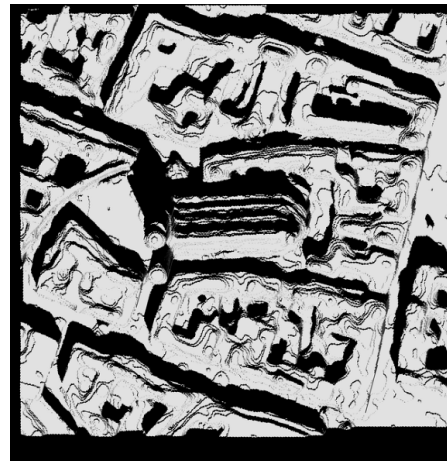
Tabelle 5.1 – Parametereinstellungen für Reflexionen an Objektoberflächen

reflection	ambient	diffuse	specular
0	0	0,7	0

Mit den Parametereinstellungen in Tab. 5.1 werden keine realistischen Oberflächenparameter gewählt. Es geht eher darum, die interessanten Bereiche im simulierten Bild (= Gebäude) mit einer hohen diffusen Rauigkeit zu versehen, um eine Sichtbarkeitsanalyse der Objekte durchführen zu können. Durch die stark gewählte diffuse Reflexionskomponente von 0,7 entfällt jegliche visuelle Darstellung der Szene. Da es lediglich um die Sichtbarmachung der Objekte für die spätere Layererstellung in Abschnitt 5.2 geht, ist dies jedoch nicht relevant. Die winkelabhängige Erscheinung der Reflexion diffuser Strahlung in den Simulationsergebnissen ist für die Maskengenerierung vorteilhaft, da gut zwischen Vorder- und Hintergrund differenziert werden kann.

Im Folgenden werden die für die in Tab. 5.1 aufgeführten Oberflächenreflexionseigenschaften resultierenden Simulationsergebnisse beschrieben.

In Abb. 5.1 sind zunächst die Simulationsergebnisse abgebildet, die sich unter Verwendung der DOMs in Abb. 4.12(a), 4.12(b) und 4.18(b) und der WV2 Bilddaten aus Abb. 4.13(a) als Eingangsdaten für den Simulator GeoRayOpt ergeben. Deutlich zu erkennen ist, dass bei der Verwendung von unterschiedlichen Positionen der Lichtquelle in POV-Ray verschiedene simulierte Bilder resultieren. Bei allen drei Graphiken in der linken Spalte ist kein Schatten abgebildet, da die Lichtquelle für diese Simulationen an dieselbe Position gesetzt wird wie der aufnehmende Sensor ($\vec{X}_{So} = \vec{X}_{Se}$). In der rechten Spalte hingegen befindet sich die Lichtquelle in POV-Ray in Bezug auf das Modell an der wahren Sonnenposition während der Szenenaufnahme ($\vec{X}_{So} = \vec{X}_{So,wahr}$). Dadurch sind hier Schattenwürfe zu erkennen, die zu verdeckten Bereichen im simulierten Bild führen. Der schwarze Rand an der unteren und linken Kante der simulierten Bilder ist nicht mit einem Schattenbereich zu verwechseln. Vielmehr lässt sich dieser auf den in Abschnitt 3.2.5 beschriebenen Aspekt zurückführen, dass die Berechnungen mittels der Maße der Modellbox vorgenommen werden. In diesen Bereichen stehen keine Informationen des jeweiligen DOMs zur Verfügung, so dass die ausgesendeten Strahlen in POV-Ray an keinerlei Oberfläche reflektiert werden, sondern ins Leere verlaufen. Auffällig ist zudem die Qualität der simulierten Bilder. Während die Frauenkirche in Abb. 5.1(c) und 5.1(d) verrauscht und durch Artefakte gestört dargestellt wird, wird sie in Abb. 5.1(e) und 5.1(f) wesentlich präziser gezeigt. Dies ist auf die vorangegangene Filterung des zugrundeliegenden optischen DOMs zurückzuführen (vgl. Abschnitt 4.2.3 und Anhang). Die weitaus hochwertigste Darstellung ist in Abb. 5.1(a) und 5.1(b) vorhanden. Dies liegt an dem für diese Simulationen verwendeten LiDAR DOM, das, im Gegensatz zum optischen DOM, auf Laserscanning-Daten basiert.

(a) LiDAR DOM; $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{Se}$ (b) LiDAR DOM; $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{So, wahr}$ (c) Unbearbeitetes WV2 DOM; $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{Se}$ (d) Unbearbeitetes WV2 DOM;
 $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{So, wahr}$ (e) Vorverarbeitetes WV2 DOM;
 $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{Se}$ (f) Vorverarbeitetes WV2 DOM;
 $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{So, wahr}$ **Abbildung 5.1** – Simulationsergebnisse für DOMs der Frauenkirche basierend auf WV2 Bilddaten

Zur Deaktivierung der aufgerauten Gebäudeumgebung wird die in Abschnitt 4.2.3 beschriebene Ebene auf Basis der panchromatischen WV2 Bilddaten von München simuliert. Das Simulationsergebnis ist in Abb. 5.2 sowohl für die aus dem LiDAR DGM generierte Ebene (vgl. Abb. 5.2(a)) als auch für die Fläche, die aus dem WV2 DGM resultiert (vgl. Abb. 5.2(b)), gezeigt. Durch Verwendung der planaren Fläche anstelle des DGMs wird sichergestellt, dass die Erzeugung einer eindeutigen Binärkarte in Abschnitt 5.2 nicht durch Reflexionsantworten von Ausreißern in der Gebäudeumgebung beeinträchtigt wird. Aufgrund der sichtbaren Homogenität der simulierten planaren Fläche kann der Szenenhintergrund eindeutig beschrieben werden, was die Szeneninterpretation erleichtert.

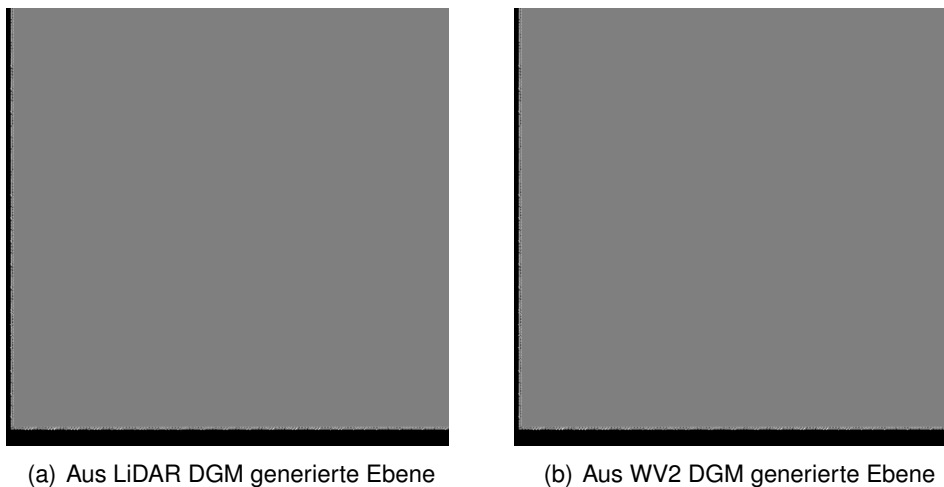
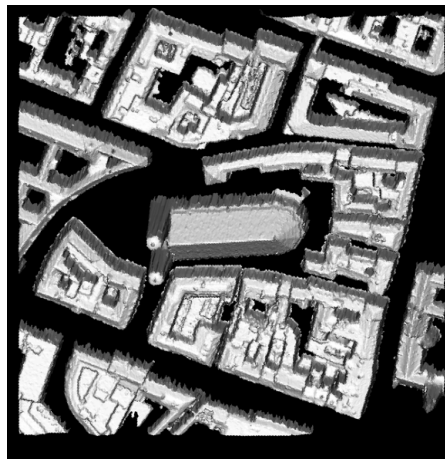
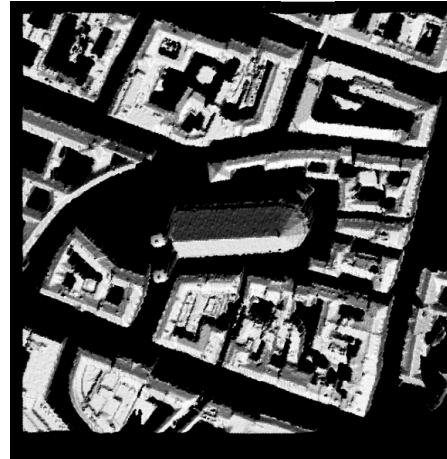
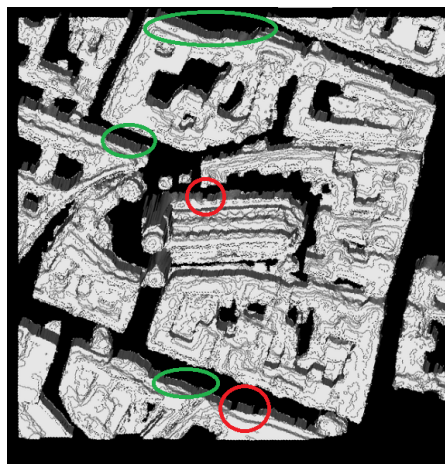
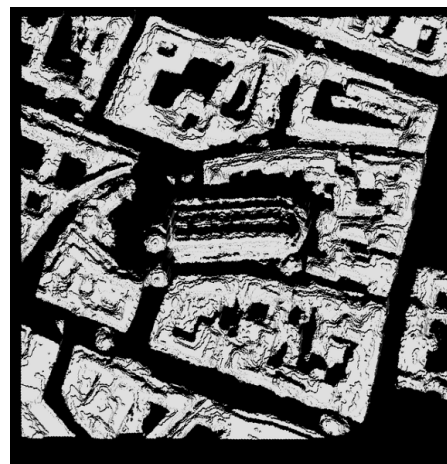
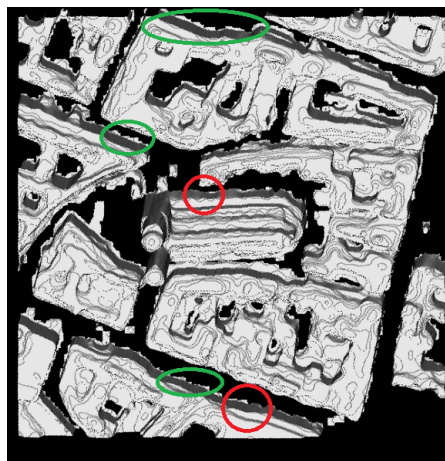
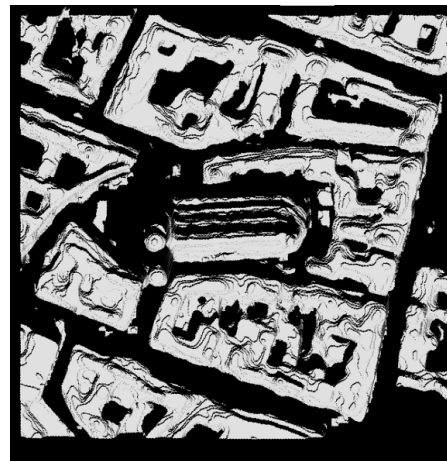


Abbildung 5.2 – Mit WV2 Bilddaten simulierte Ebenen der Frauenkirche zur Ausschaltung der Unregelmäßigkeiten in den DGMs für eine bessere Hintergrunddarstellung bei der Layergenerierung

Entsprechend der in Abb. 5.1 dargestellten simulierten DOMs der Frauenkirche, können auch die zugehörigen nDOMs visualisiert werden (vgl. Abb. 5.3). Werden zunächst Abb. 5.3(a), 5.3(c) und 5.3(e) genauer betrachtet, ist zu erkennen, dass das simulierte nDOM für $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{Se}$ den gesamten Bereich in der Satellitenaufnahme wiedergibt, der von der jeweiligen Sensorperspektive aus zum Objekt (= Gebäude) gehört. Begründet werden kann dies damit, dass bei Gleichstellung der Lichtquelle mit der Sensorposition und zusätzlich hoher diffuser Reflexionseigenschaft der Objekte in der Szene (hier 0,7) im simulierten Bild nur dort helle Bereiche resultieren, wo sich auch das Objekt befindet. Außerdem erhalten auch die dunklen Bereiche im Bild, wie zum Beispiel Gebäudedefassaden, eine maximale diffuse Komponente, so dass diese im simulierten Bild zusätzlich zu sehen sind. Die mit $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{wahr}$ simulierten nDOMs (vgl. Abb. 5.3(b), 5.3(d) und 5.3(f)) stellen hingegen die Bereiche der Gebäude im Satellitenbild dar, die sich im Sonnenlicht befinden. Wird das Simulationsergebnis des nDOMs, bei dem die Lichtquelle an derselben Position liegt wie der aufnehmende Sensor, mit dem simulierten nDOM, bei dem sich die Lichtquelle an der wahren Sonnenposition während der Aufnahme befindet, verglichen, so liegt der Unterschied in den Bereichen am Gebäude, die in der abgeschatteten Region der Satellitenaufnahme liegen. Durch Kombination der Informationen aus diesen beiden Simulationsergebnissen können die Bereiche der Gebäude identifiziert werden, die im Sonnenschatten liegen.

(a) LiDAR nDOM; $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{Se}$ (b) LiDAR nDOM; $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{So,wahr}$ (c) Unbearbeitetes WV2 nDOM;
 $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{Se}$ (d) Unbearbeitetes WV2 nDOM;
 $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{So,wahr}$ (e) Vorverarbeitetes WV2 nDOM;
 $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{Se}$ (f) Vorverarbeitetes WV2 nDOM;
 $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{So,wahr}$ **Abbildung 5.3** – Simulationsergebnisse für nDOMs der Frauenkirche basierend auf WV2 Bilddaten

In Abb. 5.3(c) sind durch die roten Kreise zwei markante Bereiche im simulierten nDOM gekennzeichnet, an denen es zu Fehlern während der Simulation kommt. Die fehlerhaft dargestellten Gebäudefassaden sind mit der fehlenden Vorverarbeitung des dem simulierten nDOM zugrundeliegenden DOMs zu begründen. Da nach [Ilehag 2016] bei der Subtraktion des DGMs Teile der Gebäudefassade verloren gehen, macht sich dies folglich auch im simulierten Ergebnis bemerkbar. Wird das nDOM jedoch im Zuge der Vorprozessierung nach [Ilehag 2016] an Gebäudegrenzen um ein Pixel ergänzt, tritt dieser Effekt nicht auf. Zum Vergleich sind an denselben Positionen wie in Abb. 5.3(c) auch in Abb. 5.3(e) die roten Umrandungen eingezeichnet. Allerdings führt die an jedem Gebäuderandpixel generelle Erweiterung des nDOMs (vgl. Anhang) auch dazu, dass im simulierten nDOM an einigen Stellen Ausfransungen auftreten, die nicht zu erhabenen Objekten im Modell gehören. Drei Beispiele dafür sind in Abb. 5.3(c) und 5.3(e) zur Gegenüberstellung grün markiert.

Wird die Grauwertverteilung in den simulierten Bildern näher betrachtet, können verschiedene Feststellungen gemacht werden. Generell gilt im Reflexionsmodell: Je steiler die Strahlen auf eine Oberfläche des Modells treffen, desto geringer ist die reflektierte diffuse Signalantwort und desto dunkler werden die Flächen im Simulationsergebnis abgebildet. Dieser Effekt ist beispielsweise an den Zwillingtürmen der Münchner Frauenkirche zu sehen. Umgekehrt gilt: Je frontaler der Sensor auf die glatten Gebäudeflächen schaut, desto stärker ist die Reflexion der Strahlen und desto heller werden die Flächen im simulierten Bild dargestellt. Demnach werden senkrechte Wände von Bauwerken in der zu simulierenden Szene vorwiegend dunkler dargestellt als flache oder nur leicht geneigte Ebenen. Folglich hängt der Grauwertverlauf einer geneigten Fläche sowohl vom Einfallswinkel der Sensorstrahlen als auch von der Neigung der jeweiligen Fläche ab.

Die Darstellung der Grauwerte in den auf Basis von WV2 Daten simulierten Ergebnisbildern wirkt anhand des soeben beschriebenen Reflexionsverhaltens nicht realistisch. Dies liegt zum einen an der nicht sehr präzisen zugrundeliegenden Datenqualität. Werden im Vergleich die auf LiDAR Daten beruhenden simulierten Bilder betrachtet, lassen sich die geneigten Dachflächen der einzelnen Gebäude viel exakter erkennen, wodurch auch eine schönere Grauwertverteilung entlang der geneigten Flächen resultiert. Zum anderen schaut der Sensor mit einem geringen Einfallswinkel steil auf die Szene, so dass bei einer festgesetzten Oberflächenreflexion von 0,7 die einzelnen Flächen in der Szene stark reflektieren und somit sehr hell mit einem einheitlichen Grauwert erscheinen. Ein weiterer Grund, warum eine realistische Darstellung der Grauwerte im optischen Fall von Grund auf schwierig ist, ist die Nichtverfügbarkeit von Informationen bezüglich der Textur der Gebäudefassaden.

5.2 Layergenerierung am Beispiel des Testgebiets München

Anhand der in Abschnitt 5.1 aufgeführten Simulationsergebnisse der DOMs, Ebenen und nDOMs auf Basis der panchromatischen WV2 Bilddaten, werden nun, ähnlich wie in Abb. 2.2 aufgezeigt, durch verschiedene Kombinationen unterschiedliche Layer erstellt. In Form von Masken können unterschiedliche Bereiche der Szene identifiziert, analysiert und beschrieben werden. Wie in Abschnitt 5.1 (vgl. Tab. 5.1) bereits erwähnt, werden die verschiedenen Layer auf Basis von diffusen Antworten von 0,7 im Reflexionsmodell erstellt. Außerdem stellt jede erzeugte Maske ein Binärbild dar, das nur aus Pixeln mit schwarzem (= 0) oder weißem (= 1) Grauwert besteht. Zur Durchführung der Sichtbarkeitsanalyse und Szeneninterpretation werden in den nachfolgenden Abschnitten 5.2.1 bis 5.2.6 verschiedene Masken gebildet, die alle einen unterschiedlichen Bereich im optischen Satellitenbild darstellen. Durch die Ableitung der Binärmasken aus den geokodierten simulierten Bildern weisen alle erzeugten Layer Absolutkoordinaten auf, so dass diese der hochauflösenden optischen Satellitenaufnahme überlagert werden können. Über das Wissen, wo im optischen Satellitenbild welche Inhalte abgebildet sind, ist es möglich, den einzelnen Bildbereichen eine entsprechende Semantik zuzuordnen.

Zur besseren Darstellung sind die weißen Binärbildbereiche in allen Graphiken in Abschnitt 5.2.1 bis 5.2.6, die verschiedene Layer abbilden, grau eingefärbt. Des Weiteren sind nur die Layer dargestellt, die sich auf Basis von LiDAR Modellen und vorverarbeiteten optischen Modellen ergeben. Die Simulationsergebnisse, die auf den unbearbeiteten Modellen beruhen, bleiben im Allgemeinen unberücksichtigt. Auf deren Verwendung wird an den entsprechenden Stellen hingewiesen.

Zur Nachbearbeitung wird nach Erstellung der Layermasken in Abschnitt 5.2.1 bis 5.2.6 ein Medianfilter mit einem Filterfenster von 5 x 5 Pixeln auf das jeweilige Binärbild angewendet.

5.2.1 Binärbildmaske 'Gebäudelayover': $BM_{Lay,Geb}$

Zur Erstellung einer Maske, die lediglich die Layoverbereiche von Gebäuden beinhaltet, wird das Ergebnis aus der Simulation des nDOMs herangezogen und über

$$\text{Pixel in } BM_{Lay,Geb} = \begin{cases} 0 & \text{falls Pixel im simulierten nDOM} = 0 \\ 1 & \text{falls Pixel im simulierten nDOM} \neq 0 \end{cases} \quad (5.1)$$

festgestellt, welche Pixel zum Layoverbereich des Gebäudes gehören und welche nicht. Aus den Simulationsergebnissen in Abb. 5.3(a) bzw. 5.3(b) ergeben sich über die in Formel 5.1 definierte Bildeinteilung die beiden Graphiken in Abb. 5.4(a) bzw. 5.4(b). Dementsprechend können die Layer in Abb. 5.4(c) bzw. 5.4(d) für unterschiedliche Sonnenpositionen aus den Simulationsergebnissen in Abb. 5.3(e) bzw. 5.3(f) abgeleitet werden. In allen vier Abbildungen sind die Gebäudebereiche gezeigt, die für den Sensor in Abhängigkeit vom Lichteinfall sichtbar sind.



(a) Gebäudelayervermaske abgeleitet aus Abb. 5.3(a); $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{Se}$



(b) Gebäudelayervermaske abgeleitet aus Abb. 5.3(b); $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{wahr}$



(c) Gebäudelayervermaske abgeleitet aus Abb. 5.3(e); $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{Se}$



(d) Gebäudelayervermaske abgeleitet aus Abb. 5.3(f); $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{wahr}$

Legende: Grauwert 0 Grauwert 1

Abbildung 5.4 – Gebäudelayervermasken $BM_{Lay,Geb}$

Werden im Anschluss anhand der erzeugten Gebäudelayerovermasken die entsprechenden Bildbereiche aus dem originalen optischen hochauflösenden Satellitenbild ausgeschnitten, ergeben sich die in Abb. 5.5(a) bis 5.5(d) aufgeführten Graphiken.



(a) Anhand von Abb. 5.4(a) ausgeschnittene Gebäudelayeroverbereiche; $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{Se}$



(b) Anhand von Abb. 5.4(b) ausgeschnittene Gebäudelayeroverbereiche; $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{wahr}$



(c) Anhand von Abb. 5.4(c) ausgeschnittene Gebäudelayeroverbereiche; $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{Se}$



(d) Anhand von Abb. 5.4(d) ausgeschnittene Gebäudelayeroverbereiche; $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{wahr}$

Abbildung 5.5 – Ausgeschnittene Gebäudelayeroverbereiche im WV2 Satellitenbild

5.2.2 Binärbildmaske 'Boden': BM_{Bo}

Unter Verwendung des simulierten DOM Bildes und jenem des simulierten nDOMs können durch Differenzbildung (vgl. Formel 5.2) zunächst die Pixel im simulierten Bild identifiziert werden, die nicht zu erhabenen Objekten in der Szene gehören.

$$\text{Diff}_{\text{DOM-nDOM}} = \text{Simuliertes DOM} - \text{Simuliertes nDOM} \quad (5.2)$$

Auf Basis dieser berechneten Differenz werden über die Bedingung in Formel 5.4 unter Verwendung der in Formel 5.3 ermittelten Hilfsmaske die Bodenpixel erfasst, die sich im gerenderten Bild befinden.

$$\text{Pixel in Hilfsmaske} = \begin{cases} 0 & \text{falls Pixel in } \text{Diff}_{\text{DOM-nDOM}} \leq 0 \\ 1 & \text{falls Pixel in } \text{Diff}_{\text{DOM-nDOM}} > 0 \end{cases} \quad (5.3)$$

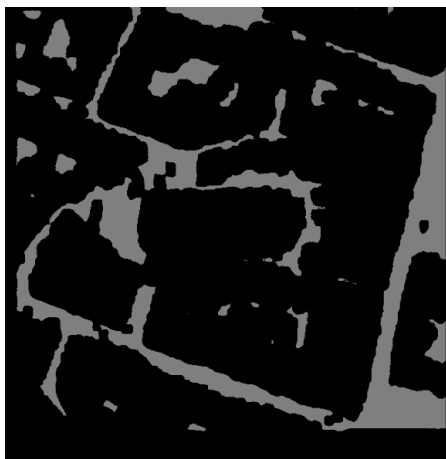
$$\text{Pixel in } BM_{Bo} = \begin{cases} 0 & \text{falls Pixel in simulierten nDOM} > 0 \\ \text{Pixel in Hilfsmaske} & \text{falls Pixel in simulierten nDOM} \leq 0 \end{cases} \quad (5.4)$$



(a) Bodenmaske durch Kombination von Abb. 5.1(a) und 5.3(a); $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{Se}$



(b) Bodenmaske durch Kombination von Abb. 5.1(b) und 5.3(b); $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{wahr}$



(c) Bodenmaske durch Kombination von Abb. 5.1(e) und 5.3(e); $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{Se}$



(d) Bodenmaske durch Kombination von Abb. 5.1(f) und 5.3(f); $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{wahr}$

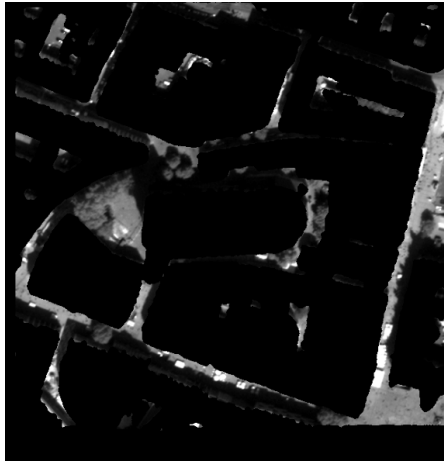
Grauwert 0 Grauwert 1

Legende:

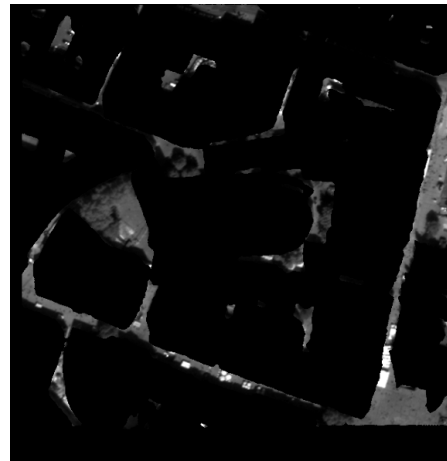
Abbildung 5.6 – Bodenmasken BM_{Bo}

In Abb. 5.6(a) bis 5.6(d) können die Layer gezeigt werden, die für LiDAR und vorverarbeitete optische DOMs und nDOMs aus Abb. 5.1 und 5.3 als Datengrundlage und unter Verwendung ver-

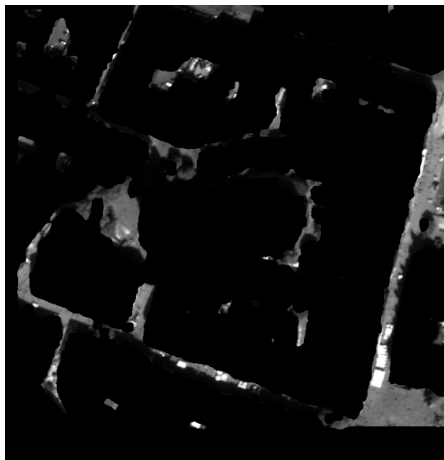
schiedener Sonnenpositionen ($\vec{X}_{So}=\vec{X}_{Se}$ und $\vec{X}_{So}=\vec{X}_{wahr}$) die Bodenbereiche angeben. Welche Regionen diese Masken in der panchromatischen WV2 Aufnahme annehmen, ist in den vier Graphiken in Abb. 5.7 zu sehen. Beim Vergleich der Graphiken in Abb. 5.4 und 5.6 (bzw. 5.5 und 5.7) ist zu erkennen, dass der größte Teil in der abgebildeten Szene durch Gebäude abgedeckt ist. Zu begründen ist dies damit, dass es sich bei der gewählten Szene um das Stadtzentrum Münchens handelt.



(a) Anhand von Abb. 5.6(a) ausgeschnittene Bodenbereiche; $\vec{X}_{So}=\vec{X}_{Se}$



(b) Anhand von Abb. 5.6(b) ausgeschnittene Bodenbereiche; $\vec{X}_{So}=\vec{X}_{wahr}$



(c) Anhand von Abb. 5.6(c) ausgeschnittene Bodenbereiche; $\vec{X}_{So}=\vec{X}_{Se}$



(d) Anhand von Abb. 5.6(d) ausgeschnittene Bodenbereiche; $\vec{X}_{So}=\vec{X}_{wahr}$

Abbildung 5.7 – Ausgeschnittene Bodenbereiche im WV2 Satellitenbild

5.2.3 Binärbildmaske 'Schatten': BM_{Sch}

Um den abgeschatteten Bereich aus dem hochauflösenden optischen WV2 Bild zu extrahieren, wird nur der Fall betrachtet, bei dem sich die Lichtquelle an ihrer wahren Position während der Szenenaufnahme befindet ($\vec{X}_{So}=\vec{X}_{wahr}$). Für $\vec{X}_{So}=\vec{X}_{Se}$ treten keine Schattenbereiche auf, so dass diese folglich nicht anhand eines Layers identifiziert werden können. Zur Erstellung der Schatten-

maske BM_{Sch} muss zunächst das simulierte DOM, das in Abb. 5.1(b) bzw. 5.1(f) dargestellt ist, herangezogen werden, um über Formel 5.5 eine Hilfsmaske zu erstellen, die alle im DOM vorkommenden schwarzen Bereiche detektiert.

$$\text{Pixel in Hilfsmaske} = \begin{cases} 0 & \text{falls Pixel im simulierten DOM} \neq 0 \\ 1 & \text{falls Pixel im simulierten DOM} = 0 \end{cases} \quad (5.5)$$

Im Anschluss daran ist das simulierte Bild der jeweiligen Ebene erforderlich, die in Abb. 5.2(a) bzw. 5.2(b) dargestellt ist. Auf Grundlage dieser können in Formel 5.6 die in der Hilfsmaske enthaltenen Stellen, die keine Schattenbereiche darstellen, entfernt werden.

$$\text{Pixel in } BM_{Sch} = \begin{cases} 0 & \text{falls Pixel in simulierter Ebene} = 0 \\ \text{Pixel in Hilfsmaske} & \text{falls Pixel in simulierter Ebene} \neq 0 \end{cases} \quad (5.6)$$



(a) Schattenmaske durch Kombination von Abb. 5.1(b) und 5.2(a); $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{wahr}$



(b) Schattenmaske durch Kombination von Abb. 5.1(f) und 5.2(b); $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{wahr}$

Legende:

Grauwert 0



Grauwert 1



(c) Anhand von Abb. 5.8(a) ausgeschnittene Schattenbereiche; $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{wahr}$



(d) Anhand von Abb. 5.8(b) ausgeschnittene Schattenbereiche; $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{wahr}$

Abbildung 5.8 – Schattenmasken BM_{Sch} und ausgeschnittene Schattenbereiche im WV2 Satellitenbild

Die in BM_{Sch} detektierten Schattenbereiche sind in Abb. 5.8 mit den zugehörigen Bildbereichen in der originalen optischen Satellitenaufnahme aufgeführt. Der detektierte Schatten kann in einem weiteren Schritt noch näher untersucht werden, indem eine Aufteilung in Schattenbereiche, die Teile der Gebäude abdecken ($BM_{Sch,Geb}$), und in Schattenregionen, die sich am Boden der Szene befinden ($BM_{Sch,Bo}$), stattfindet.

Wird die erstellte Gebäudelayerovermaske $BM_{Lay,Geb}$, die sich für eine der Sensorposition gleichgesetzten Sonnenposition $\vec{X}_{So}=\vec{X}_{Se}$ in Abb. 5.4(a) bzw. 5.4(c) ergibt, mit der auf Grundlage von $\vec{X}_{So}=\vec{X}_{wahr}$ berechneten Gebäudelayerovermaske (vgl. Abb. 5.4(b) bzw. 5.4(d)) über Formel 5.7 kombiniert, resultieren die Gebäudebereiche, die im Schattenwurf der Sonne liegen. Die zugehörigen Graphiken sind in Abb. 5.9 enthalten.

$$BM_{Sch,Geb} = BM_{Lay,Geb,\vec{X}_{So}=\vec{X}_{Se}} - BM_{Lay,Geb,\vec{X}_{So}=\vec{X}_{wahr}} \quad (5.7)$$



(a) Gebäudeschattenmaske durch Kombination von Abb. 5.4(a) und 5.4(b)



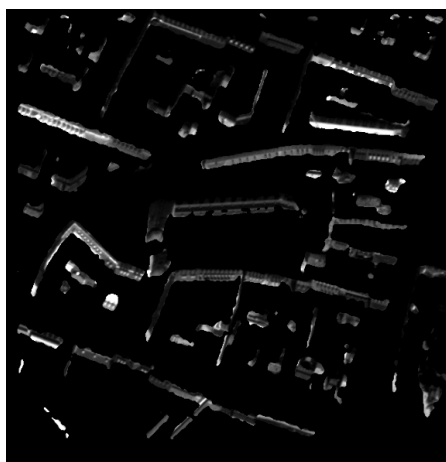
(b) Gebäudeschattenmaske durch Kombination von Abb. 5.4(c) und 5.4(d)

Legende:

Grauwert 0



Grauwert 1



(c) Anhand von Abb. 5.9(a) ausgeschnittene Gebäudeschattenbereiche



(d) Anhand von Abb. 5.9(b) ausgeschnittene Gebäudeschattenbereiche

Abbildung 5.9 – Gebäudeschattenmasken $BM_{Sch,Geb}$ und ausgeschnittene Gebäudeschattenbereiche im WV2 Satellitenbild

Werden die Informationen aus den in Abb. 5.6 dargestellten Layern verwendet, kann identifiziert werden, welche Bereiche des Bodens im Schatten des Satellitenbildes liegen ($BM_{Sch,Bo}$).

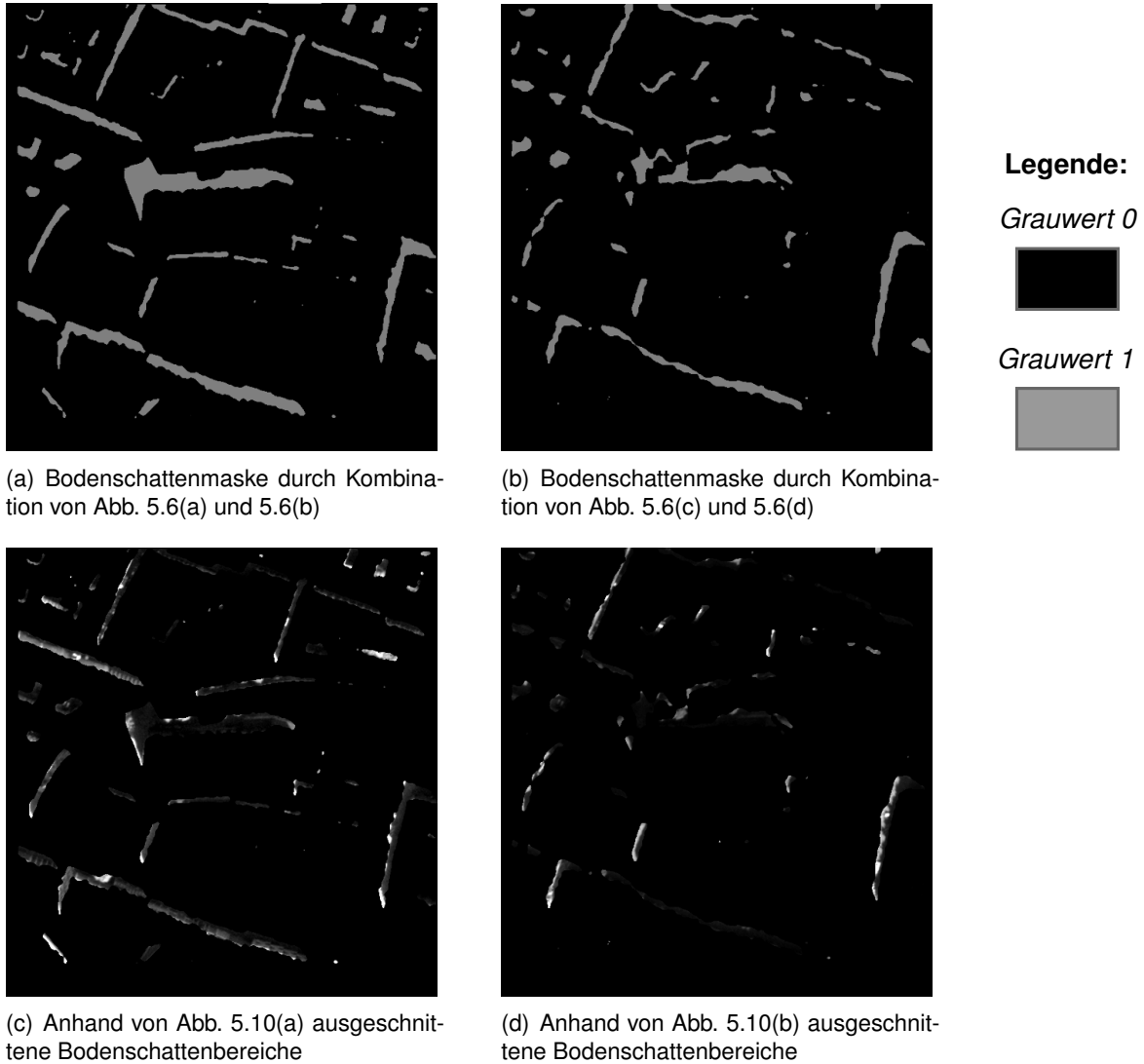


Abbildung 5.10 – Bodenschattenmasken $BM_{Sch,Bo}$ und ausgeschnittene Bodenschattenbereiche im WV2 Satellitenbild

In Formel 5.8 wird dafür im ersten Schritt die für $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{Se}$ (vgl. Abb. 5.6(a) bzw. 5.6(c)) berechneten Layer herangezogen, um die Darstellung der Binärbildbereiche umzukehren. Das bedeutet, weiße Bereiche werden schwarz und schwarze Bereiche werden weiß dargestellt.

$$\text{Pixel in Hilfsmaske 1} = \begin{cases} 0 & \text{falls Pixel in } BM_{Bo, \vec{X}_{So} = \vec{X}_{Se}} \neq 0 \\ 1 & \text{falls Pixel in } BM_{Bo, \vec{X}_{So} = \vec{X}_{Se}} = 0 \end{cases} \quad (5.8)$$

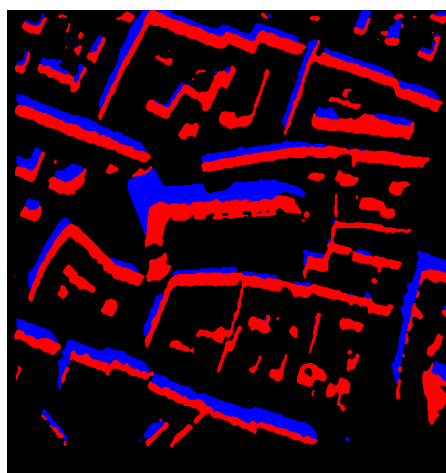
Im zweiten Schritt werden dieselben Berechnungen wie in Formel 5.8 auch für die mit $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{wahr}$ ermittelten Layer (vgl. Abb. 5.6(b) bzw. 5.6(d)) vorgenommen (vgl. Formel 5.9).

$$\text{Pixel in Hilfsmaske 2} = \begin{cases} 0 & \text{falls Pixel in } BM_{Bo, \vec{X}_{So}=\vec{X}_{wahr}} \neq 0 \\ 1 & \text{falls Pixel in } BM_{Bo, \vec{X}_{So}=\vec{X}_{wahr}} = 0 \end{cases} \quad (5.9)$$

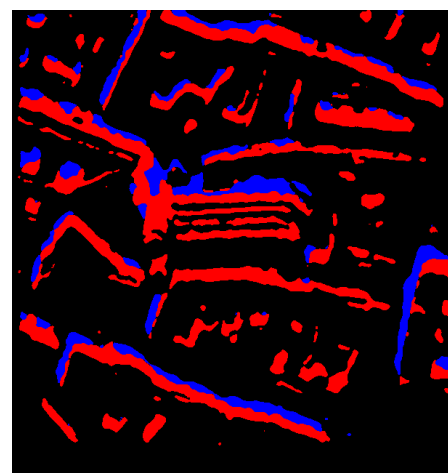
Anschließend können in Formel 5.10 durch Differenzbildung der Resultate aus Formel 5.9 und 5.8 die gesuchten Bodenschattenbereiche $BM_{Sch,Bo}$ bestimmt werden. Diese sind, zusammen mit den ausgeschnittenen Bildbereichen in der optischen WV2 Aufnahme, in Abb. 5.10 dargestellt.

$$BM_{Sch,Bo} = \text{Hilfsmaske 2} - \text{Hilfsmaske 1} \quad (5.10)$$

Unter Verwendung unterschiedlicher Simulationsergebnisse und anschließender Kombination der damit erstellten Layer ist es möglich, Informationen aus einem hochauflösenden optischen Satellitenbild herauszuholen, die in der originalen Satellitenaufnahme nicht einsehbar sind. Zur besseren Veranschaulichung werden die auf LiDAR Daten beruhenden Schattenbereiche aus Abb. 5.9(a) und 5.10(a) anhand einer farblichen Unterteilung zusammen in Abb. 5.11(a) visualisiert. Genauso wird für die auf WV2 Daten basierenden Bildbereiche in Abb. 5.9(b) und 5.10(b) vorgegangen, welche gemeinsam in Abb. 5.11(b) dargestellt sind. Die blaue Farbe visualisiert jeweils den Schatten der Szene, der sich am Boden befindet, und in Rot ist der abgeschattete Bereich der Gebäude gezeigt.



(a) Gebäudeschattenmaske aus Abb. 5.9(a) und Bodenschattenmaske aus Abb. 5.10(a)



(b) Gebäudeschattenmaske aus Abb. 5.9(b) und Bodenschattenmaske aus Abb. 5.10(b)

Schatten am Boden Schatten am Gebäude

Legende:

Abbildung 5.11 – Farblich unterteilte Schattenmaske BM_{Sch}

5.2.4 Binärbildmaske 'Kein Wert': BM_{KW}

Als Zusatzinformation kann ein Layer generiert werden, der den Bereich darstellt, für den keine Überlappung zwischen dem hochauflösenden optischen Satellitenbild und dem DOM vorhanden ist. Dafür notwendig ist zum einen das Simulationsergebnis des DOMs, zum anderen das in Abschnitt 5.2.3 bereits verwendete simulierte Bild der Ebene. Da der Unterschied der detektierten Nullwertbereiche für die verschiedenen Sonnenpositionen $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{Se}$ und $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{wahr}$ nicht signifikant ist, werden die Resultate nur für $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{wahr}$ aufgezeigt.

Da die gesuchten Bildbereiche, für die keine Informationen vorhanden sind, im simulierten DOM schwarz dargestellt werden, müssen zunächst alle schwarzen Regionen in Abb. 5.1(b) bzw. Abb. 5.1(f) detektiert werden. Dafür wird über Formel 5.11 genauso vorgegangen wie bei der Generierung der Schattenmaske in Formel 5.5.

$$\text{Pixel in Hilfsmaske} = \begin{cases} 0 & \text{falls Pixel im simulierten DOM} \neq 0 \\ 1 & \text{falls Pixel im simulierten DOM} = 0 \end{cases} \quad (5.11)$$

Um nun andere schwarz dargestellte Regionen im simulierten Bild, wie zum Beispiel Schattenbereiche, aus der in Formel 5.11 erstellten Hilfsmaske zu eliminieren, so dass lediglich die schwarzen Bereiche erfasst werden, die keine Repräsentation durch das DOM aufweisen, müssen die Berechnungen in Formel 5.12 vorgenommen werden.

$$\text{Pixel in } BM_{KW} = \begin{cases} 0 & \text{falls Pixel in simulierter Ebene} > 0 \\ \text{Pixel in Hilfsmaske} & \text{falls Pixel in simulierter Ebene} \leq 0 \end{cases} \quad (5.12)$$

Die in BM_{KW} enthaltenen Pixel sind in Abb. 5.12(a) bzw. 5.12(b) veranschaulicht. Der Vollständigkeit halber ist jeweils auch der ausgeschnittene Teil aus der optischen WV2 Aufnahme aufgeführt (vgl. Abb. 5.12(c) bzw. 5.12(d)).

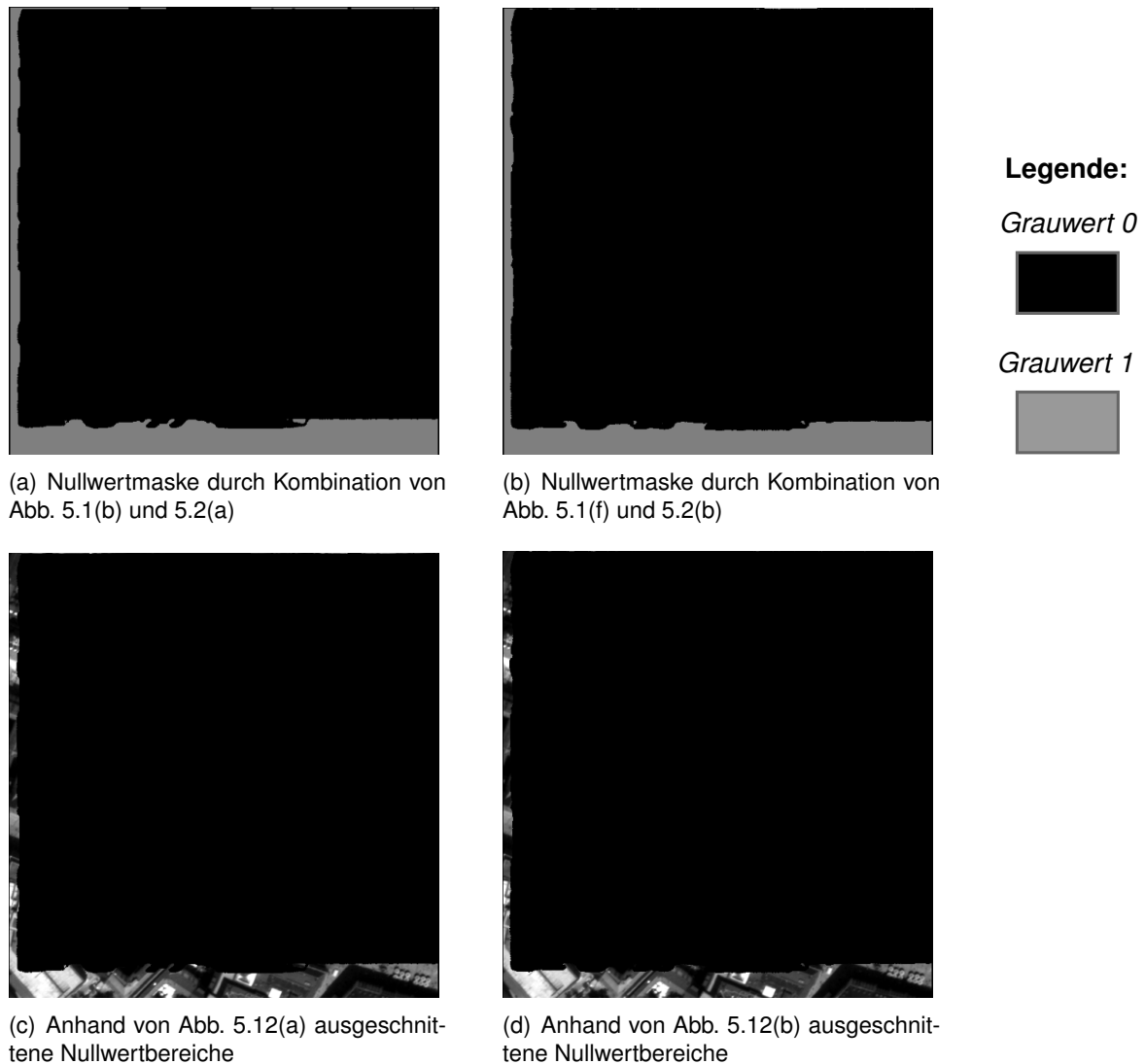


Abbildung 5.12 – Nullwertmasken BM_{KW} und ausgeschnittene Nullwertbereiche im WV2 Satellitenbild

5.2.5 Binärbildmaske 'Vegetation': BM_{Veg}

Neben den in Abschnitt 5.2.1 bis 5.2.4 generierten Binärbildmasken kann auch ein Layer erstellt werden, der die Vegetation abbildet, die in der jeweiligen Szene vorhanden ist. Grund hierfür ist, dass auch jeder Baum, Busch oder jegliche andere Art von Vegetation im DOM eine gewisse, wenn auch verrauschte, Form aufweist. Zur Detektion der Vegetation können jedoch nur die auf optischen Daten basierenden Modelle herangezogen werden, da, wie in Abschnitt 4.2.1 bereits erwähnt, in den vorliegenden LiDAR Modellen kein Bewuchs enthalten ist.

Zur Generierung einer Vegetationsmaske ist es notwendig, die gesamte Simulationsumgebung einmal unter Aktivierung und einmal unter Deaktivierung des in [Ilehaag 2016] entwickelten Vorverarbeitungsmoduls durchlaufen zu lassen. Bei Simulation auf Basis von vorverarbeiteten Daten ist demnach keine Vegetation in den Simulationsergebnissen enthalten, da diese im Vorverarbeitungsschritt anhand von Multispektraldaten aus dem DOM herausgefiltert wird (vgl. Abschnitt 4.2.3 und Anhang). Bei Prozessierung auf Grundlage der originalen, nicht bearbeiteten Daten ist die in der

Szene vorhandene Vegetation jedoch noch existent, da auf eine Vorprozessierung des DOMs verzichtet wird. Nach den beiden Simulationsdurchläufen stehen sowohl für die vorverarbeiteten Daten als auch für die unbearbeiteten Daten die in Abschnitt 5.2.1 bis 5.2.4 beschriebenen Binärbildmasken zur Verfügung. Unter Verwendung der resultierenden Gebäudelayovermasken $BM_{Lay,Geb,vor}$ und $BM_{Lay,Geb,ori}$ können über Formel 5.13 die Layoverbereiche der Vegetation $BM_{Lay,Veg}$ in der Szene bestimmt werden. $BM_{Lay,Geb,vor}$ bezeichnet dabei die Maske, die aus den vorprozessierten Daten resultiert und $BM_{Lay,Geb,ori}$ den Layer, der sich aus den unbearbeiteten, originalen Daten ergibt. Die detektierten Layoverbereiche der Vegetation sind in Abb. 5.13 für wahre Lichtverhältnisse ($\vec{X}_{So} = \vec{X}_{wahr}$) gezeigt.

$$\text{Pixel in } BM_{Lay,Veg} = \begin{cases} 0 & \text{falls Pixel in } BM_{Lay,Geb,vor} = 1 \\ \text{Pixel in } BM_{Lay,Geb,ori} & \text{falls Pixel in } BM_{Lay,Geb,vor} \neq 1 \end{cases} \quad (5.13)$$

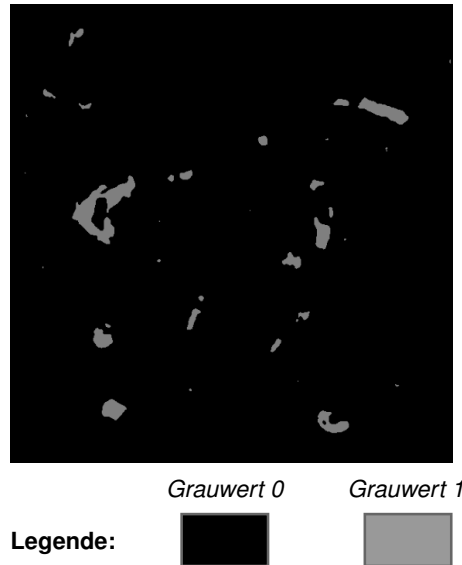


Abbildung 5.13 – Unbearbeitete Vegetationslayovermaske $BM_{Lay,Veg}$

Die in Abb. 5.13 zu sehenden Löcher innerhalb der als Layer dargestellten Vegetation der Szene sind auf fehlerhafte Stellen im Simulationsergebnis des vorprozessierten nDOMs zurückzuführen (vgl. Abb. 5.3(f)). Da das simulierte nDOM zur Berechnung der Gebäudelayovermaske $BM_{Lay,Geb}$ und diese wiederum zur Erstellung des Vegetationslayers $BM_{Lay,Veg}$ verwendet wird, pflanzt sich der im nDOM auftretende Fehler fort und erklärt die lückenhafte Darstellung der Flora in Abb. 5.13. Durch die Nachbearbeitung des Vegetationslayers anhand von morphologischen Operatoren kann die fehlerhafte Abbildung verbessert und an den in Wirklichkeit vorkommenden Pflanzenwuchs angenähert werden. Zur Verbesserung wird der morphologische Operator *Closing* herangezogen, bei dem zunächst eine *Dilatation* und anschließend eine *Erosion* auf das in Abb. 5.13 gezeigte Bild angewendet werden. Da die fehlerhaft bestehenden Löcher relativ groß sind, wird hier eine Maske mit der Größe von 20 x 20 Pixel verwendet. Das verbesserte, nachbearbeitete Bild der Maske des Vegetationslayovers ist in Abb. 5.14(a) illustriert. Hier sind nun keinerlei Löcher mehr zu erkennen.

Durch Selektion der Vegetationsbereiche aus dem optischen Satellitenbild anhand der eben generierten Vegetationslayovermaske wird den entsprechenden Stellen eine Semantik zugeordnet (vgl. Abb. 5.14(c)). Es ist festzustellen, dass der Layer die reale Vegetation der Szene gut nachbildet.

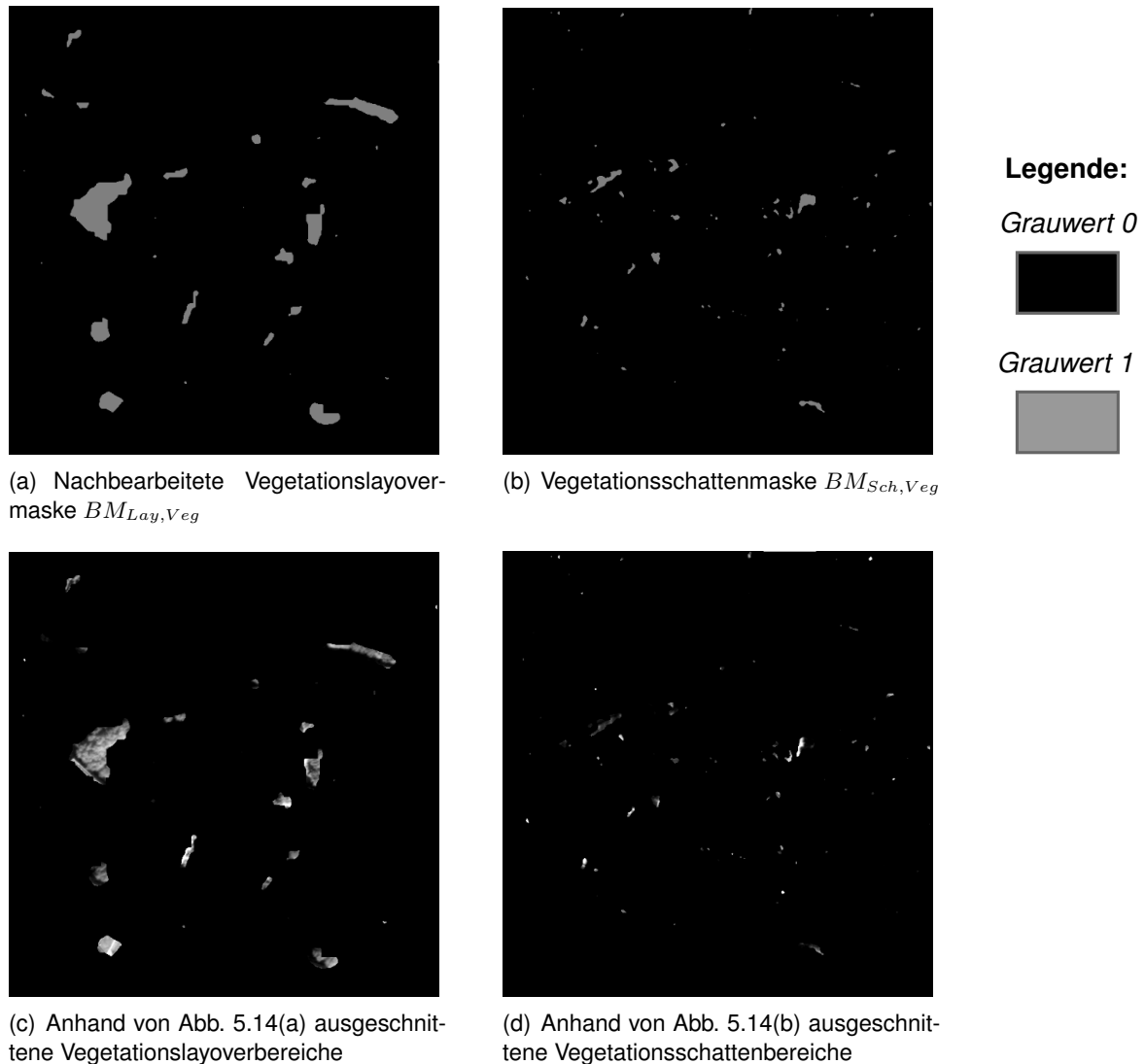


Abbildung 5.14 – Vegetationsmasken $BM_{Lay,Veg}$ und $BM_{Sch,Veg}$ und die zugehörigen ausgeschnittenen Bereiche im WV2 Satellitenbild

Neben den Gebäudelayerovermasken können auch die Schattenmasken, die sich für $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{wahr}$ ergeben, zur Analyse der in der betrachteten Szene vorkommenden Vegetation genutzt werden. Mittels der beiden Layer $BM_{Sch,vor}$ und $BM_{Sch,ori}$ werden über Formel 5.14 Schattenbereiche detektiert, die durch die Vegetation im optischen Satellitenbild entstehen. Der resultierende Schattenlayer der Vegetation $BM_{Sch,Veg}$ ist in Abb. 5.14(b) dargestellt. Die zugehörigen Bildbereiche in der originalen WV2 Aufnahme sind Abb. 5.14(d) zu entnehmen. Da in der gewählten Szene der Frauenkirche zum einen nicht viel Vegetation enthalten ist, zum anderen eine enge Bebauung vorliegt, sind die Schattenbereiche der Vegetation nicht stark ausgeprägt. Außerdem kann über die Größe des Schattens auf die Höhe der Vegetation in der Szene geschlossen werden. Demnach ist der

Bewuchs um die Frauenkirche in München nicht sehr hoch.

$$\text{Pixel in } BM_{Sch,Veg} = \begin{cases} 0 & \text{falls Pixel in } BM_{Sch,vor} = 1 \\ \text{Pixel in } BM_{Sch,ori} & \text{falls Pixel in } BM_{Sch,vor} \neq 1 \end{cases} \quad (5.14)$$

Die gemeinsame Darstellung der detektierten Layover- und Schattenbereiche der Vegetation ist in Abb. 5.15 gegeben. Erstere sind dabei in blauer, Letztere in roter Farbe dargestellt.

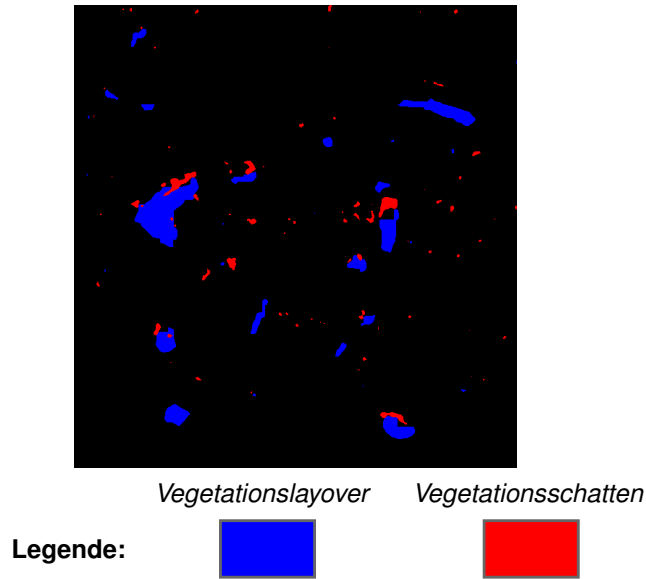


Abbildung 5.15 – Farblich unterteilte Vegetationsmaske BM_{Veg} aus Abb. 5.14(a) und 5.14(b)

5.2.6 Kombinierte Darstellung der Binärbildmasken

Werden die in den verschiedenen Layern identifizierten Bildbereiche in eine Graphik zusammengefügt und mit unterschiedlichen Farben versehen, resultiert Abb. 5.16(a) für eine zugrundeliegende Geometrie aus LiDAR Daten und Abb. 5.16(b) für eine zugrundeliegende Geometrie aus WV2 Daten. Um auch die Schattenbereiche zeigen zu können, wird nur der Fall betrachtet, bei dem die Sonnenposition und die Sensorposition verschieden sind ($\vec{X}_{So} \neq \vec{X}_{wahr}$). In Rot sind jeweils die im optischen Satellitenbild vorkommenden Gebäudebereiche (Layover) gezeigt (vgl. Abschnitt 5.2.1). Die in Abschnitt 5.2.2 ermittelten Bodenregionen sind mit grüner Farbe markiert. Blau dargestellt ist der gesamte Schattenbereich, den die Sonne in der WV2 Aufnahme verursacht (vgl. Abschnitt 5.2.3). Die in Abschnitt 5.2.4 ermittelte Region, die den Bereich im optischen Satellitenbild abdeckt, für den keine DOM Informationen für die Simulation existieren, ist grau eingefärbt. Die detektierte Vegetation der Szene stellt die Farbe magenta dar (vgl. Abschnitt 5.2.5). Wiederum ist zu beobachten, dass in den LiDAR Eingangsdaten keinerlei, in den optischen jedoch schon Vegetation enthalten ist. Aus diesem Grund sind die magenta farbigen Bildbereiche nur in Abb. 5.16(b) zu sehen. Bei Vergleich der einzelnen klassifizierten Bildregionen mit dem originalen WV2 Bild in Abb.

4.13(a) ist festzustellen, dass die semantische Zuordnung gut funktioniert.

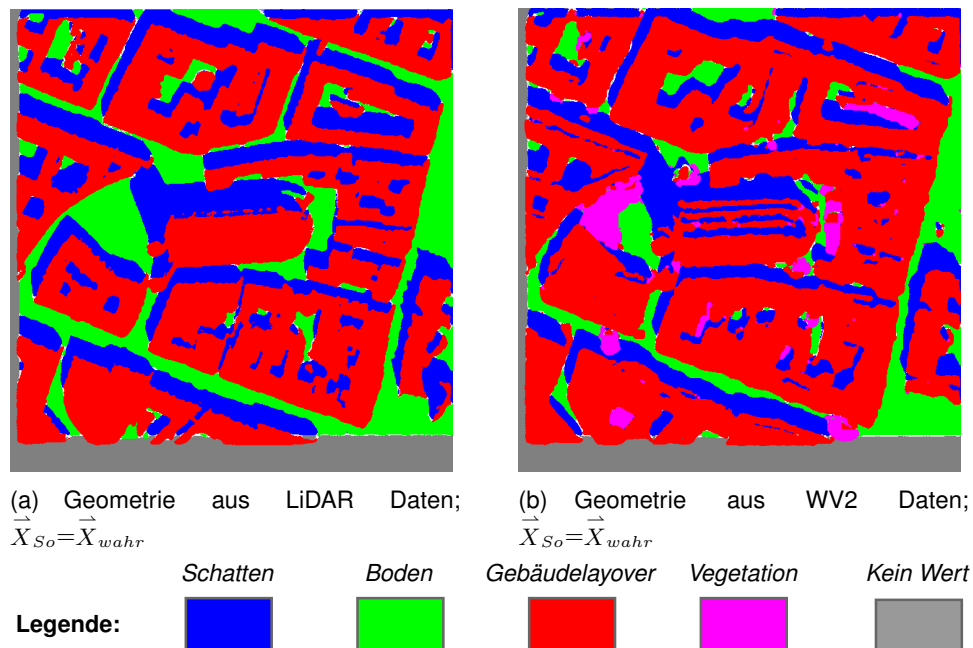


Abbildung 5.16 – Szeneninterpretation durch die auf WV2 Bilddaten basierenden Layermasken

5.3 Simulationen am Beispiel des Testgebiets Dongying

Durch Veränderung der Datensätze, die in die vollautomatische Simulationsumgebung (vgl. Abb. 3.1) als Input eingehen, können für das zweite gewählte Testgebiet Dongying dieselben Simulationen durchgeführt werden, wie die in Abschnitt 5.1 und 5.2 aufgeführten der Frauenkirche. Es müssen lediglich drei Dateneingaben zu Beginn der Simulationsumgebung abgeändert werden. Zum einen müssen das DOM, zum anderen das hochauflösende optische Satellitenbild und die Multispektralaufnahme zur Filterung des DOMs für Dongying angegeben werden. Anhand der in Abschnitt 4.2.2 aufgezeigten Datengrundlage (vgl. Abb. 4.14 und 4.15) werden die in Tab. 5.2 aufgeführten Kombinationen zur Simulation verwendet.

Tabelle 5.2 – Datenkombinationen zur Durchführung von Simulation für das Testgebiet Dongying

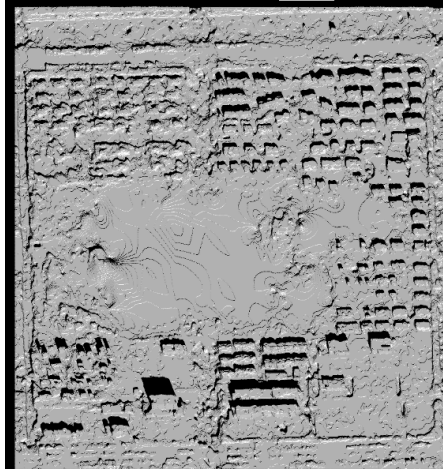
Kombination	DOM (Auflösung: 0,7 m)	Optisches Satellitenbild	Multispektralaufnahme (Auflösung: 0,7 m)
①	PHR1B DOM	QB2 Bild (Auflösung: 0,6 m)	WV2 Bild
②	PHR1B DOM	WV2 Bild (Auflösung: 0,5 m)	WV2 Bild
③	PHR1B DOM	PHR1B Bild (Auflösung: 0,7 m)	WV2 Bild

Der Übersichtlichkeit halber werden nicht alle Simulationsergebnisse aufgeführt, sondern nur einzelne herausgegriffen und kurz erläutert. In Abb. 5.17 sind beispielsweise die für $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{wahr}$ simulierten vorverarbeiteten DOMs und nDOMs aufgeführt.

Zunächst wird auf die simulierten Bilder des vorprozessierten DOMs in der linken Spalte von Abb. 5.17 eingegangen. Obwohl in den Satellitenaufnahmen des QB2, WV2 und PHR1B Sensors nicht dieselbe Anzahl an Gebäuden enthalten ist (vgl. Abb. 4.15), ist festzustellen, dass dies in den simulierten Bildern schon der Fall ist. Grund hierfür ist, dass allen Simulationen dasselbe optische DOM zugrunde liegt, das die geometrischen Informationen für die Simulationen liefert. Der Unterschied der simulierten Bilder liegt lediglich in der Art der Abbildung der Gebäude, da diese von der jeweiligen Aufnahmegeometrie des zugrundeliegenden optischen Satellitenbildes abhängt. Dies bedeutet, dass je nach Blickrichtung des Sensors der vertikale Lagerversatz der Gebäude in unterschiedliche Richtungen fällt. Die Sichtbarkeit der Gebäudefassaden hängt vom Einfallswinkel ab. Da die Aufnahme des QB2 Sensors auf einem Blickwinkel von $\beta = 167,54^\circ$ und einem Einfallswinkel von $\theta = 15,52^\circ$ basiert, erfolgt die geometrische Verzerrung der in Abb. 5.17(a) dargestellten Gebäude leicht nach Norden, wobei nur wenig der Südfassade sichtbar ist. Für $\beta = -30,32^\circ$ und $\theta = 25,60^\circ$ des WV2 Bildes ist Abb. 5.17(c) eine relativ starke Tendenz des vertikalen Lagerversatzes der Gebäude nach Südosten zu entnehmen. Durch den größeren Einfallswinkel der WV2 Aufnahme im Gegensatz zum QB2 Bild ist in Abb. 5.17(c) mehr von der Gebäudewand zu erkennen. Allerdings handelt es sich nun um die nördliche und westliche Gebäudefassade, die aufgrund des Lichteinfalls abgeschattet ist. Die der PHR1B Aufnahme zugrundeliegenden Aufnahmewinkel $\beta = 20,02^\circ$ und $\theta = 19,61^\circ$ begründen die leichte Überlagerung der Objekte im simulierten Bild nach Süden (vgl. Abb. 5.17(e)). Der Abbildungseffekt der Gebäude und deren Fassaden sind ähnlich zu denen in Abb. 5.17(c).

Deutlich kann auch der Schattenwurf der einzelnen Gebäude wahrgenommen werden. Die Länge des abgebildeten Schattens kann zum einen auf die Höhe der in der Szene befindlichen Gebäude, zum anderen auf den in den Metadaten der optischen Satellitenbilder angegebenen Elevationswinkel der Sonne ε_{So} zurückgeführt werden (vgl. Tab. 4.8). Es ist festzustellen, dass die Häuser im linken oberen Block niedriger sind als die restlichen Gebäude. Zudem ist der Schattendarstellung zu entnehmen, dass sich im Süden der Szene ein Hochhaus befindet. Die Richtung des Schattenwurfs wird durch den Azimutwinkel der Sonnenposition α_{So} bestimmt. Dieser liegt nach Tab. 4.8 für die drei Aufnahmen zwischen 159° und 168° , so dass die Abschattung in allen simulierten Bildern annähernd in dieselbe Richtung fällt.

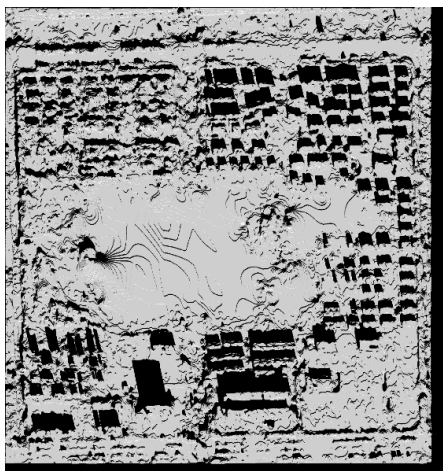
Beim Vergleich mit den zur Simulation herangezogenen optischen Satellitenaufnahmen stimmen sowohl die Darstellung als auch der Schattenwurf der Gebäude in den simulierten Bildern 5.17(a), 5.17(c) und 5.17(e) mit jenen in Abb. 4.15(a) bis 4.15(c) überein.



(a) Mit QB2 Bilddaten simuliertes DOM



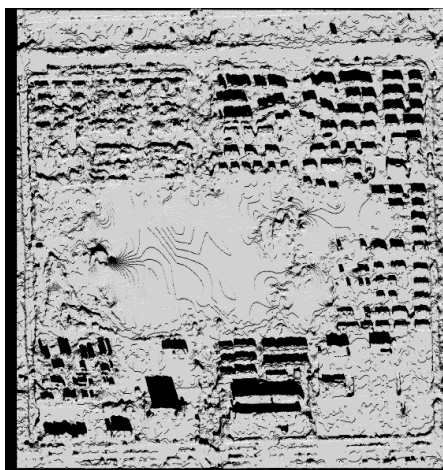
(b) Mit QB2 Bilddaten simuliertes nDOM



(c) Mit WV2 Bilddaten simuliertes DOM



(d) Mit WV2 Bilddaten simuliertes nDOM



(e) Mit PHR1B Bilddaten simuliertes DOM



(f) Mit PHR1B Bilddaten simuliertes nDOM

Abbildung 5.17 – Simulationsergebnisse des vorverarbeiteten PHR1B DOMs und nDOMs von Dongying; $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{wahr}$

Werden anschließend die Simulationsergebnisse der vorverarbeiteten nDOMs des Testgebiets Dongying betrachtet, sind in Abb. 5.17(b), 5.17(d) und 5.17(f) eindeutig Bereiche zu erkennen, die keine Gebäude darstellen. Diese sind durch fehlerhafte Höheninformationen im nDOM zu begründen. Da nach Abb. 4.16 das nDOM aus dem DOM resultiert, kann die fehlerhafte Darstellung der simulierten nDOMs auf die Qualität des DOMs zurückgeführt werden. Wie in Abschnitt 4.2.3 bereits beschrieben, wird unter Verwendung der zur Verfügung stehenden Multispektralaufnahme des WV2 Sensors kein sichtbares Ergebnis bei der Filterung der Vegetation aus dem DOM erreicht. Grund ist der nur wenig ausgeprägte Bewuchs in der Multispektralaufnahme, da diese am 17.01.2013 im Winter erfasst wurde. Das PHR1B DOM ist jedoch aus Bilddaten abgeleitet, die im Oktober 2013 aufgenommen wurden. Somit enthält das DOM durchaus Vegetation, die im digitalen Modell eine bestimmte geometrische Form einnimmt und im Simulationsergebnis sichtbar ist.

5.4 Diskussion

Neben den in Abschnitt 5.1 bis 5.3 bereits durchgeführten Bewertungen der Simulationsergebnisse soll in diesem Abschnitt auf die limitierenden Faktoren für die aus GeoRayOpt gelieferten Resultate eingegangen werden. Abschnitt 5.4.1 stellt die Ungenauigkeiten der Simulationsergebnisse aufgrund unterschiedlicher Datengrundlagen dar. Außerdem werden in Abschnitt 5.4.2 die den Simulationen zugrundeliegende Datenqualität und in Abschnitt 5.4.3 der Einfluss der Vegetation auf das Simulationsergebnis erörtert.

5.4.1 Lagegenauigkeit der Simulationsergebnisse

Werden die in Abb. 5.1 und 5.3 simulierten Bilder der DOMs und nDOMs, welche auf optischen WV2 Bilddaten basieren, zum Vergleich mit dem zur Simulation verwendeten panchromatischen optischen Satellitenbild (vgl. Abb. 4.13(a)) überlagert, kann kein auffallender Versatz zwischen den jeweiligen beiden Bildern vernommen werden. Dies bedeutet, dass die aus GeoRayOpt resultierenden geokodierten Bilder gut mit der zugrundeliegenden originalen optischen Satellitenaufnahme zusammenpassen und somit wahrheitsgetreue Abbildungen der Szene vorliegen. Grund hierfür ist einerseits, dass die vier Satellitenbilder, die zur Generierung des DOMs herangezogen wurden, aus derselben Datenquelle stammen wie das zur Simulation verwendete optische Satellitenbild. Beiden Inputs liegt der WV2 Sensor zugrunde, wodurch auch in beiden Eingangsdaten dieselbe Lokalisationsgenauigkeit enthalten ist, die sich ebenfalls im jeweiligen simulierten Bild widerspiegelt. Der Lokalisierungsfehler des WV2 Sensors liegt nach Tab. 4.4 bei 3,5 m. Andererseits wird, wie in Abschnitt 4.2.3 in Abb. 4.16 gezeigt, das nDOM aus dem DOM abgeleitet, so dass auch in diesem Modell eine Ungenauigkeit in der horizontalen Lokalisation von 3,5 m enthalten ist.

Werden hingegen die in Abb. 5.1 und 5.3 simulierten Bilder der DOMs und nDOMs, welche auf LiDAR Bilddaten basieren, und das zur Simulation herangezogene panchromatische optische Bild miteinander verglichen, ist ein kleiner Unterschied in der Überlagerung zu erkennen. Dieser lässt sich damit begründen, dass das aus flugzeuggetragenen Laserscanning-Daten ermittelte LiDAR

DOM aus einer anderen Datenquelle stammt als die durch den WV2 Sensor erfasste Satellitenaufnahme. Somit liegen verschiedene Lokalisationsgenauigkeiten vor.

Werden die simulierten Resultate aus Abb. 5.17 ebenfalls der originalen optischen Aufnahme (QB2, WV2 oder PHR1B), deren Bilddaten der jeweiligen Simulation zugrunde liegen, gegenübergestellt, können auch in Bezug auf Dongying Aussagen über die Lagegenauigkeit der Simulationsergebnisse getroffen werden. Je nachdem, auf welchen Bilddaten die Simulation basiert, unterliegen dem jeweiligen Simulationsergebnis nach Tab. 4.4 verschiedene horizontale Lokalisationsgenauigkeiten. Dabei ist unter Verwendung der Metadaten des PHR1B Bildes als Datengrundlage für die Simulation kein Lageversatz der simulierten Gebäude gegenüber dem originalen PHR1B Satellitenbild zu erkennen. Grund ist, dass das zugrundeliegende DOM (vgl. Abb. 4.14) ebenfalls aus PHR1B Bilddaten errechnet wurde und somit beide Datensätze dieselbe Lokalisationsgenauigkeit von 3 m aufweisen. Werden jedoch die Bilddaten der in Abb. 4.15(a) dargestellten QB2 Aufnahme zur Simulation herangezogen, ist ein Lageunterschied bei dessen Überlagerung mit den simulierten Bildern gegeben. Grund hierfür ist eine große horizontale Lageungenauigkeit des QB2 Sensors von 23 m, die sich von jener des PHR1B Sensors (= 3 m) unterscheidet. Somit unterliegen den unterschiedlichen Datenquellen verschiedene horizontale Lagegenauigkeiten, die den Versatz erklären. Bei Simulation auf Basis der WV2 Bilddaten ist zwar ein Lagerversatz zwischen den simulierten Gebäuden und jenen im originalen WV2 Satellitenbild zu erkennen, dieser wirkt sich jedoch nicht so stark aus wie bei der QB2 Aufnahme. Begründet werden kann dies durch den weitaus geringeren Fehler in der horizontalen Lage von 3,5 m (vgl. Tab. 4.4), der sich nur geringfügig von dem des PHR1B DOMs mit 3 m unterscheidet.

Abgesehen von der unterschiedlichen horizontalen Lagegenauigkeit der der jeweiligen Simulationen zugrundeliegenden Datensätze, ist ohnehin keine optimale Überlagerung der Simulationsergebnisse mit den optischen Originalbildern zu erwarten. Grund hierfür ist zum einen, dass eine perspektivische Aufnahme der optischen Sensoren in POV-Ray durch eine orthographisch aufnehmende Kamera angenähert wird. Zum anderen wird für die Simulationen ein DOM mit Rasterinformationen verwendet, um ein Vektormodell abzubilden. Aufgrund dieser Aspekte wird das simulierte Bild nie exakt mit der originalen optischen Satellitenaufnahme zu überlagern sein. Da die Simulationsergebnisse aus dem GeoRayOpt Simulator zur Erstellung der verschiedenen, in Abschnitt 5.2 aufgeführten, Layer der Szene herangezogen werden, enthalten auch diese die eben beschriebenen Ungenauigkeiten. Werden anhand der verschiedenen generierten Layer in Abschnitt 5.2 die zugehörigen Bereiche aus der originalen optischen Satellitenaufnahme zur Szenenbeschreibung ausgeschnitten, ist zu sehen, dass die Selektion der Bildbereiche nie ganz exakt vonstatten geht. Es werden auch Pixel extrahiert, die nicht dem jeweiligen, durch den Layer beschriebenen Bildinhalt, zugehören. Würde allerdings eine statistische Auswertung bezüglich der ausgeschnittenen Bildbereiche gemacht werden, würde ein hoher Prozentsatz an Pixeln den Bildbereichen zugeordnet werden können, die der jeweilige Layer selektieren soll. In der Gesamtheit kann festgestellt werden, dass für alle Layer die Ausblendung aller nicht relevanten Bildbereiche gut funktioniert und sich bei einer Bildanalyse nur auf die entsprechenden dargestellten Bereiche im optischen Satellitenbild konzentriert werden kann.

5.4.2 Qualität des DOMs

Die Simulationsergebnisse hängen maßgeblich von der Qualität des zugrundeliegenden DOMs ab. Je höher die Auflösung des DOMs, desto hochwertiger und präziser sind die simulierten Resultate. Werden die optischen DOMs der ausgewählten Testgebiete miteinander verglichen, ist festzustellen, dass das DOM von Dongying in Abb. 4.14 qualitativ weitaus schlechter ist als das DOM von München in Abb. 4.12(b). Ersteres weist eine räumliche Auflösung von 0,7 m auf, wohingegen dem DOM der Frauenkirche eine bessere Auflösung von 0,5 m zugrunde liegt.

Außerdem spielt die Anzahl an Satellitenaufnahmen, die zur Generierung der verschiedenen DOMs herangezogen wurden, eine entscheidende Rolle für die Qualität der Resultate aus GeoRayOpt. Das DOM der Frauenkirche wurde aus vier und jenes von Dongying aus drei Aufnahmen berechnet. Je mehr optische Satellitenbilder zur Erstellung des digitalen Modells verwendet werden, desto besser wird die Form und die Ausdehnung der relevanten Objekte (= Gebäude) darin dargestellt. Da das DOM die Geometrie für die Simulationen in GeoRayOpt angibt, können damit einhergehend für die Szene der Frauenkirche auch aussagekräftigere und qualitativ hochwertigere Simulationsergebnisse erzielt werden als für die Szene in Dongying.

Wie schon des Öfteren erwähnt, stellt das in die vollautomatisierte Simulationsumgebung eingehende DOM auch die Grundlage für das daraus abgeleitete DGM und nDOM dar (vgl. Abb. 4.16). Daher gehen die im DOM enthaltenen Fehler und Ungenauigkeiten auch in die beiden abgeleiteten Modelle mit ein. Folglich spiegelt sich die Qualität des DOMs auch in den erstellten Layern zur Szeneninterpretation wider, da die auf DOM, DGM und nDOM basierenden simulierten Bilder zur Ermittlung dieser herangezogen werden. Schlussendlich zieht sich damit die Qualität des DOMs durch die gesamte Simulationsumgebung.

5.4.3 Einfluss der Vegetation

Kann die Vegetation mittels des Vorverarbeitungsmoduls nach [Ilehag 2016] nicht angemessen aus dem DOM herausgefiltert werden, schlägt sich dies in den Simulationsergebnissen aus GeoRayOpt und den daraus bestimmten Binärbildmasken nieder. Dies ist beispielsweise an der generierten Gebäudelayervermaske für das zweite Testgebiet Dongying in Abb. 5.18(a) und 5.18(b) zu sehen. Neben der blau dargestellten Layermaske sind zum Vergleich die Grundrisse der sich in der Szene befindlichen Gebäude rot eingezeichnet.

Gründe für eine nicht geeignete Filterung können sein:

1. Keine Verfügbarkeit einer Multispektralaufnahme zur Detektion der Vegetation im DOM
2. Ein im Winter erfasstes Multispektralbild der zu filternden Szene

Beide aufgeführten Fälle stellen die Ursache für die in Abb. 5.18 fehlerhaft erfassten Gebäudelayerbereiche dar. Fall 1 tritt ein, da das DOM von Dongying aus panchromatischen PHR1B Aufnahmen generiert wurde, die zugehörigen multispektralen Satellitenbilder der Masterarbeit jedoch

nicht vorliegen. Lediglich eine multispektrale WV2 und QB2 Aufnahme, die beide die Szene von Dongying darstellen, stehen zur Verfügung. Nach Abb. 4.15 wurden jedoch beide Aufnahmen im Winter erfasst, so dass auch der zweite, oben aufgeführte, Fall eintritt. Aufgrund der weniger stark abweichenden Lagegenauigkeit des WV2 Sensors von jener des PHR1B Sensors (vgl. Tab. 4.4), wird zur Vorprozessierung des DOMs von Dongying das multispektrale WV2 herangezogen. Da für die Filterung der Vegetation aus der Szene Dongying keine adäquate Multispektralaufnahme zur Verfügung steht, sind noch Bereiche im vorverarbeiteten DOM enthalten, die das Simulationsergebnis in Bezug auf die Identifikation von Gebäuden negativ beeinflussen. Optimal wäre es demnach, eine Multispektralaufnahme zur Verfügung zu haben, die auf derselben Datengrundlage basiert wie das zu verarbeitende DOM.

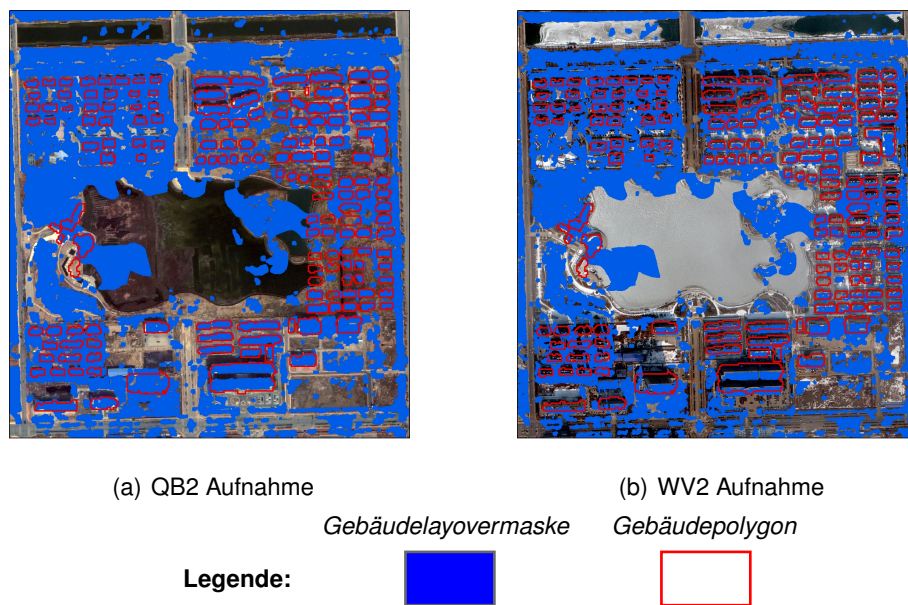


Abbildung 5.18 – Fehlerhaft detektierte Gebäudelayerbereiche aufgrund von Vegetation im DOM [Leichtle 2016]

Folglich kann die in Abschnitt 4.2.3 aufgestellte Vermutung, dass sich die Vegetation, die nach Filterung basierend auf der zur Verfügung stehenden Datengrundlage noch in den vorverarbeiteten DOMs enthalten ist, auf die Simulationsergebnisse und die daraus generierten Binärbildmasken negativ auswirkt, bestätigt werden. Die detailliert beschriebenen Ursachen für eine erfolgreiche Vorprozessierung des DOMs der Frauenkirche bzw. für eine weniger gelungene Filterung des DOMs von Dongying sind ebenfalls Abschnitt 4.2.3 zu entnehmen.

Kapitel 6

Anwendungsmöglichkeiten der Simulationsergebnisse

An die Erläuterung und Diskussion der Simulationsergebnisse aus GeoRayOpt schließt sich in diesem Kapitel eine Darstellung der Anwendungsmöglichkeiten der Simulationsergebnisse an. Dabei werden zunächst die Daten des zweiten gewählten Testgebiets Dongying herangezogen, um eine mögliche Verbesserung bezüglich der Durchführung einer Change Detection zu erläutern. Als weitere Anwendungsmöglichkeit wird auf die objektbasierte Klassifikation von optischen Satellitenbildern eingegangen. Anschließend erfolgt eine Beschreibung zur Kombination von Simulationsergebnissen basierend auf optischen und SAR Bilddaten.

6.1 Verbesserung von Veränderungsanalysen am Beispiel des Testgebiets Dongying



Abbildung 6.1 – Zeitliche Veränderung des Testgebiets Dongying

Wie in Abb. 6.1 veranschaulicht, treten zwischen den drei zeitlich versetzten optischen Satellitenaufnahmen der chinesischen Region Dongying Veränderungen auf. Bei den Veränderungen handelt es sich vorwiegend um Neubauten von Gebäuden, wobei auch Abrisse von der einen zur anderen Szene auftreten können. Wie zu erwarten, ist das Ausmaß der Änderungen für den Zeitraum von sechs Jahren zwischen der QB2 und WV2 Aufnahme größer als für den Zeitraum von neun

Monaten zwischen dem WV2 und PHR1B Bild. Dennoch sind auch hier vereinzelt Verwandlungen innerhalb des Ausschnitts von Dongying zu erkennen. Werden die in Abb. 5.17 aufgeführten simulierten Bilder mit den zugehörigen originalen optischen Satellitenaufnahmen durch Überlagerung verglichen, kann die Position von Gebäuden detektiert werden, die eventuell in einem der beiden optischen Aufnahmen des QB2 oder WV2 Sensors noch nicht enthalten sind, in den zeitlich jüngeren PHR1B Aufnahmen, aus denen das für die Simulation verwendete DOM stammt, jedoch existieren. Somit ist die Voraussetzung zur Durchführung einer Veränderungsanalyse geschaffen.

Im Folgenden wird die Vorgehensweise zur Durchführung von Veränderungsanalysen und die dabei auftretenden Probleme in Anlehnung an [Leichtle u. a. 2016] erläutert. Die detaillierten Inhalte können in der eben angegebenen Literatur nachgelesen werden.

Ausgangspunkt bei der Analyse von Veränderungen der chinesischen Region Dongying sind die Grundrisse der sich in der Szene befindenden Gebäude. Diese werden vom DFD am DLR aus einem PHR1B nDOM, das von *Astrium* mit einer Auflösung von 4 m bereitgestellt ist, durch Segmentierung extrahiert. Aus Budgetgründen im Rahmen des zugeordneten Forschungsprojekts steht kein höher aufgelöstes nDOM zur Verfügung. Das nDOM basiert zwar auf denselben drei panchromatischen PHR1B Aufnahmen wie das am IMF-PBA (DLR) berechnete nDOM (vgl. Abb. 4.19(c)), stellt jedoch aufgrund des unterschiedlichen zugrundeliegenden Berechnungsalgorithmus und der abweichenden Auflösung nicht exakt dieselbe Datengrundlage dar. Die extrahierten Geometrien der Gebäude werden im Anschluss dem QB2 und WV2 Bild überlagert (vgl. Abb. 6.2), so dass anhand der multitemporalen Multispektraldaten innerhalb eines jeden Grundrisses verschiedene Eigenschaften, wie zum Beispiel die Textur, berechnet werden können. Da die zeitliche Spanne zwischen der WV2 Aufnahme und den PHR1B Aufnahmen, die den Gebäudepolygonen zugrunde liegen, nur gering ist (neun Monate), ist in Abb. 6.2(b) in fast jedem Polygon ein Gebäude enthalten. Falls sich innerhalb eines Grundrisses im WV2 Bild kein Gebäude befindet, liegt die Vermutung nahe, dass dort innerhalb von neun Monaten ein Gebäude erbaut wurde. Wenn in der WV2 Aufnahme jedoch Bauwerke existieren, denen kein Polygon zugeordnet ist, so deutet dies auf einen Abriss des jeweiligen Gebäudes hin. Ein solcher Effekt ist in Abb. 6.2(b) links unten anhand der beiden Gebäude mit blauen Dachflächen zu sehen. Im Gegensatz zur WV2 Aufnahme können in Abb. 6.2(a) viele Gebäudegeometrien erkannt werden, in denen kein Gebäude liegt. Dies bedeutet, dass vom 25.02.2007 bis 18.10.2013 an diesen Stellen Bauwerke entstanden sind.

Auf Basis der in beiden Aufnahmen für jedes Polygon berechneten Merkmale wird durch Vergleich entschieden, ob es zu Veränderungen des Gebiets kam oder nicht. Wenn sich in korrespondierenden Grundrissen jeweils ein Gebäude oder jeweils Boden befindet, sind die ermittelten Signaturen ähnlich. Falls jedoch einmal ein Bauwerk und einmal Boden in den beiden betrachteten Gebäudegeometrien vorhanden sind, unterscheiden sich die Eigenschaften voneinander. Durch die bestimmte Ähnlichkeit bzw. Unähnlichkeit können die Vergleichsergebnisse anschließend in zwei Klassen eingeteilt werden. Anhand der Klassifikation kann festgestellt werden, an welchen Positionen der Szene für den betrachteten Zeitraum (25.02.2007 bis 17.01.2013) ein Gebäude erbaut wurde, abgerissen wurde oder bestehen blieb.



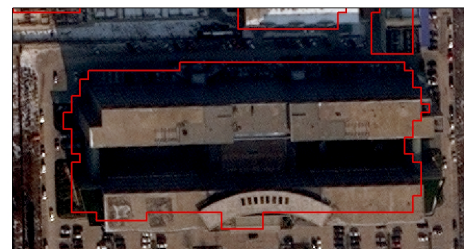
(a) QB2 Bild mit Gebäudepolygonen



(b) WV2 Bild mit Gebäudepolygonen



(c) Ausschnitt aus Abb. 6.2(a)



(d) Ausschnitt aus Abb. 6.2(b)

Gebäudepolygon

Legende:



Abbildung 6.2 – Optische Satellitenbilder von Dongying mit Gebäudepolygonen überlagert [Leichtle 2016]

Wie in Abb. 6.2(c) und 6.2(d) anhand von Einzelgebäuden gezeigt, sind die Gebäudegrundrisse an der gleichen Position, entsprechen jedoch nur bei einer Nadiraufnahme der gesamten Gebäudeausdehnung im hochauflösenden optischen Satellitenbild. Da optische Sensoren in den meisten Fällen keine Nadiraufnahmen liefern ($\theta \neq 0^\circ$) und es damit zum vertikalen Lagerversatz der Gebäude in der optischen Aufnahme kommt, kann die Ausdehnung der Bauwerke im Bild nicht mehr vollständig durch das Gebäudepolygon beschrieben werden. Grund hierfür ist, dass nicht nur das Dach, sondern auch Fassaden des Gebäudes im optischen Satellitenbild zu sehen sind. Je höher dabei das betrachtete Gebäude und je flacher der einfallende Sehstrahl des Sensors, desto stärker ist dieser Effekt zu beobachten (vgl. Abb. 6.2(d)). Sind die zur Durchführung der Veränderungsanalyse zeitlich versetzten Satellitenbilder in verschiedenen Aufnahmegeometrien mit differierendem Sonnenstand erfasst worden, erfolgt die Darstellung der Gebäudefassaden in den beiden optischen Satellitenaufnahmen unterschiedlich. In Abb. 6.2(c) beispielsweise ist die südliche Fassade des Hochhauses zu erkennen, die durch Sonnenlicht beleuchtet und damit hell dargestellt wird. Im Gegensatz dazu ist in Abb. 6.2(d) die Nordfassade des Gebäudes sichtbar, die im Schatten der

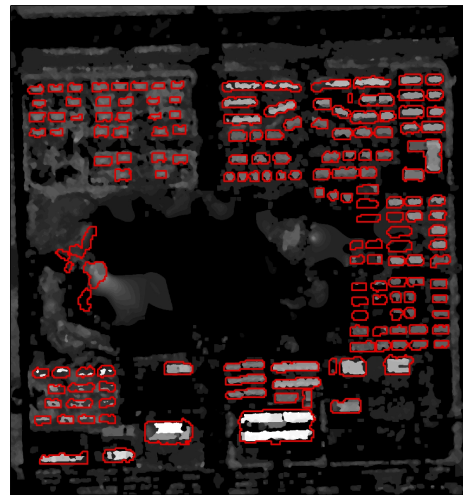
Sonne dunkel abgebildet wird. Obwohl die Struktur der jeweiligen sichtbaren Gebäudewand gleich ist, sehen sie in den beiden hochauflösenden optischen Satellitenbildern verschieden aus. Da zur Change Detection unter anderem die Grauwerte innerhalb der Polygone verglichen werden, treten durch das unterschiedliche Aussehen des Gebäudes in den beiden Satellitenaufnahmen Schwierigkeiten bei der Gegenüberstellung auf.

Eine weitere Schwachstelle der Veränderungsanalysen liegt in der Ungenauigkeit der aus dem nDOM entnommenen Gebäudegeometrien, die in Abb. 6.3(a) für das gesamte Testgebiet Dongying zu sehen sind. Zum einen werden die Grundrisse über ein automatisches Verfahren extrahiert, welches gewisse Unsicherheiten aufweist. Zum anderen ist es nicht möglich, aus einem nDOM mit einer Auflösung von nur 4 m exakte Gebäudegrenzen zu detektieren. Außerdem weist das bereitgestellte nDOM an sich einige Fehler auf. Daher wird zum Teil für zwei nah aneinander gebaute Gebäude ein gemeinsamer Gebäudegrundriss segmentiert. Besonders in dicht und eng bebauten Städten kommt es damit durch die fehlerhafte Zuordnung der Polygone bei Veränderungsanalysen zu Einschränkungen. Der in Abb. 6.2(c) und 6.2(d) gezeigte Polygon umfasst zum Beispiel zwei hohe Gebäude, die nur einen geringen Abstand voneinander aufweisen und in der Mitte durch einen Durchgang verbunden sind. Die fehlerhafte Polygonextraktion ist auf die ungenauen Höheninformationen in dem in Abb. 6.3(c) gezeigten nDOM zurückzuführen, das die gewählten Einzelgebäude in Abb. 6.2(c) und 6.2(d) darstellt. Der dunkle Bereich innerhalb der rot markierten Gebäudegeometrie müsste heller erscheinen, da dort der Übergangsbereich zwischen den beiden Gebäuden ist. Der schmale Bereich links und rechts davon müsste hingegen dunkler dargestellt werden, da sich hier der Zwischenraum zwischen den beiden Gebäuden befindet. Die Ungenauigkeiten im nDOM sind auf die Aufnahmegeometrie der Satellitenbilder zurückzuführen, die als Datengrundlage für die Berechnung des nDOMs dienen.

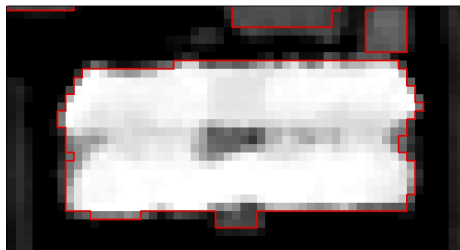
Des Weiteren weist das Verfahren zur Durchführung von Change Detections Ungenauigkeiten auf, da stets der gesamte Bereich innerhalb eines jeden Polygons zum Vergleich zwischen den beiden zeitlich versetzten Satellitenaufnahmen herangezogen wird. Oftmals sind jedoch Bereiche in den Gebäudegeometrien enthalten, die nicht zu Gebäuden gehören. Bodenpixel beispielsweise können das Ergebnis der Analyse verfälschen.



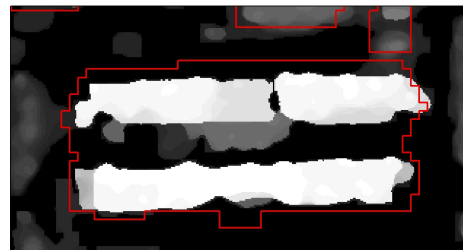
(a) nDOM (4 m Auflösung) mit Gebäudepolygonen



(b) nDOM (0,7 m Auflösung) mit Gebäudepolygonen



(c) Ausschnitt aus Abb. 6.3(a)



(d) Ausschnitt aus Abb. 6.3(b)

Gebäudepolygon

Legende:

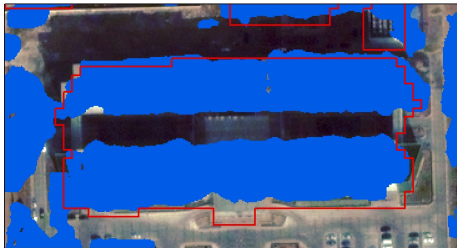


Abbildung 6.3 – nDOMs von *Astrium* (linke Spalte) und vom IMF-PBA des DLR (rechte Spalte) mit Gebäudepolygonen überlagert [Leichtle 2016]

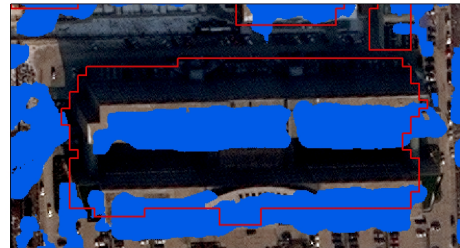
Werden in Zukunft die aus den Simulationsergebnissen des GeoRayOpt Simulators generierten Layer in die Veränderungsanalyse integriert, kann der eben beschriebenen Problematik, die sich bei der Durchführung von Change Detections ergibt, entgegengewirkt werden. Werden die georeferenzierten Layer, die bestimmte Bildbereiche des Testgebiets Dongying beschreiben, als .tiff Datei abgespeichert, können diese im Programm *ArcMap* mit den ebenfalls georeferenzierten Grundrissen der Szene überlagert werden. Nun können die Informationen, die durch die verschiedenen Layer gegeben sind, in Wert gesetzt werden und zur Verbesserung der Veränderungsanalysen beitragen.

Wie in Abb. 6.4(a) und 6.4(b) zu sehen ist, kann mit Hilfe der generierten, blau dargestellten Gebäudelayerovermaske zunächst eine Identifikation von zwei Einzelgebäuden vorgenommen werden. Grund hierfür ist, dass der Simulation in GeoRayOpt das wesentlich präzisere nDOM aus Abb. 4.19(c) zugrunde liegt. In Abb. 6.3(b) sind diesem die aus dem 4 m nDOM extrahierten Gebäudepolygone überlagert. Ein Ausschnitt für die beiden betrachteten Einzelgebäude ist in Abb. 6.3(d) zu sehen. Beim Vergleich der nDOM Ausschnitte in Abb. 6.3(c) und 6.3(d) ist aufgrund der verschie-

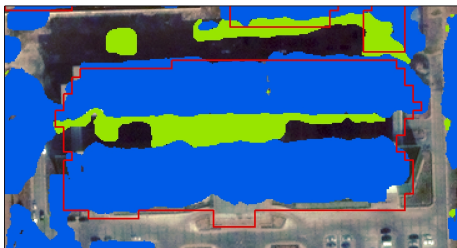
denen Auflösungen ein eindeutiger Unterschied in der Darstellung der Gebäude zu beobachten. Außerdem können die Informationen des Gebäudelayeroverlayers den Bereich, der zum Vergleich für die Veränderungsanalyse innerhalb der Polygone verwendet wird, eingrenzen. Unabhängig vom vertikalen Lagerversatz der Gebäude im Satellitenbild können über die blau markierten Regionen lediglich die beleuchteten Gebäudeteile zum Vergleich herangezogen werden. Der Einfluss der im Schatten liegenden Gebäudefassaden, die deutlich unterschiedliche Grauwerte zu den beleuchteten Teilen aufweisen, wird dadurch eliminiert.



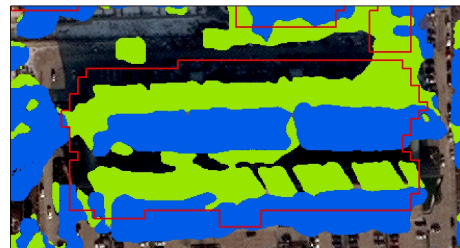
(a) QB2 Bild mit Polygon und Gebäudelayerovermaske



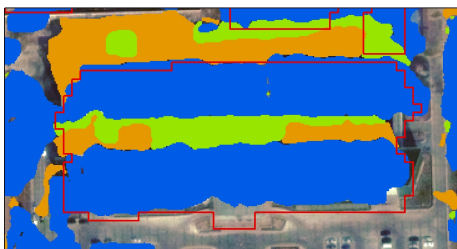
(b) WV2 Bild mit Polygon und Gebäudelayerovermaske



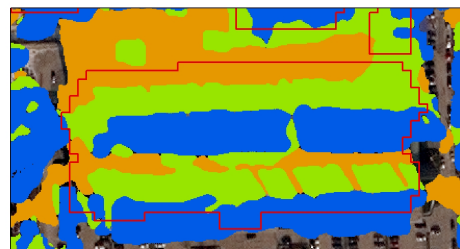
(c) QB2 Bild mit Polygon und Gebäudelayerover- und Gebäudeschattenmaske



(d) WV2 Bild mit Polygon und Gebäudelayerover- und Gebäudeschattenmaske



(e) QB2 Bild mit Polygon und Gebäudelayerover-, Gebäudeschatten- und Bodenschattenmaske



(f) WV2 Bild mit Polygon und Gebäudelayerover-, Gebäudeschatten- und Bodenschattenmaske

Legende:

Gebäudelayerovermaske Gebäudeschattenmaske Bodenschattenmaske Gebäudepolygon

Abbildung 6.4 – Verwendung verschiedener Layer zur Verbesserung von Veränderungsanalysen [Leichtle 2016]

Durch Hinzunahme der generierten Schattenmaske, die in einen abgeschatteten Boden- und Gebäudebereich unterteilt wird, kann die Change Detection noch weiter verbessert werden. Die in Abb. 6.4(c) und 6.4(d) grün dargestellte Maske gibt genau den Gebäudebereich im optischen Sa-

tellitenbild an, der im Sonnenschatten liegt und damit nicht beleuchtet ist. Somit stellt die Gebäude-layovermaske und die Gebäudeschattenmaske den gesamten Bildbereich dar, der vom jeweiligen Gebäude abgedeckt wird. In Abb. 6.4(c) kann durch den grün markierten Bereich im Polygon der Übergang zwischen den beiden Einzelgebäuden abgeleitet werden. An dieser Stelle kann wiederum auf das zugrundeliegende nDOM aus Abb. 6.3(d) verwiesen werden. Anhand der grauen Pixel in der Mitte ist zu erkennen, dass sich dort ein erhabenes Objekt befindet, das höher als der in schwarz gezeigte Boden und niedriger als die in weiß dargestellten Gebäude ist.

In Abb. 6.4(d) deutet der grüne Bereich auf einen großen vertikalen Lagerversatz der Gebäude im optischen Bild hin. Der blaue Layoverbereich des südlicheren Gebäudes ist damit nicht mehr vollkommen im extrahierten Polygon enthalten. Vorwiegend die abgeschatteten Gebäudeanteile gehen in die Veränderungsanalyse ein. Im Gegensatz dazu ist in Abb. 6.4(c) der beleuchtete Layover des südlichen Gebäudes ganz enthalten und fast keine geometrische Verzerrung der Gebäude zu beobachten.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Change Detection mittels des Wissens, wo in der Satellitenaufnahme abgeschattete und beleuchtete Gebäudebereiche liegen, zu unterstützen. Zum einen können die dunkleren Schattenbereiche der Gebäude anhand der Grauwerte der beleuchteten Flächen in einem Vorverarbeitungsschritt aufgehellt werden, so dass der Einfluss der Lichtquelle ausgeschaltet wird. Zum anderen ist es möglich einen separaten Vergleich der beiden Gebäudeanteile durchzuführen. Beide Verfahren liefern eine eindeutigere Zuordnung zwischen den korrespondierenden Gebäuden im QB2 und WV2 Bild, wodurch die Veränderungsanalyse deutlich besser und aussagekräftiger werden kann.

Als letzte Zusatzinformation kann die Binärbildmaske herangezogen werden, die den abgeschatteten Bodenbereich in der optischen Satellitenaufnahme wiedergibt. In Abb. 6.4(e) und 6.4(f) ist dieser orange dargestellt. Dadurch stehen Informationen bezüglich der Bereiche im Gebäudepolygon zur Verfügung, die nicht zum Gebäude gehören. Durch die orangen Einfärbungen zwischen den beiden blauen Layoverbereichen der zwei Einzelgebäude in Abb. 6.4(e) und 6.4(f) wird nochmals deutlich, dass es sich nicht nur um ein Gebäude handelt. Zudem ist in Abb. 6.4(f) am oberen Ende der Geometrie zu sehen, dass sich, aufgrund des Lageversatzes des Gebäudes, auch abgeschattete Bodenbereiche im Polygon befinden. Wie oben bereits erwähnt, wird bisher stets der gesamte Bereich innerhalb der roten Polygone zur Durchführung der Change Detection analysiert. Werden die Bodenbereiche jedoch zukünftig für die Durchführung der Analysen außer Acht gelassen, basiert die Veränderungsanalyse nur auf Pixeln, die Gebäuden zugeordnet werden können.

6.2 Objektbasierte Klassifikation optischer Satellitenbilder

Neben der in Abschnitt 6.1 aufgeführten Anwendungsmöglichkeit können die generierten Binärbildmasken zur Unterstützung der Klassifikation von optischen Satellitenbildern herangezogen werden. Grundsätzlich wird zwischen pixel- und objektbasierten Klassifikationsverfahren unterschieden [Koch u. a. 2003]. Pixelbasierte Klassifizierungen werden beispielsweise bei überwachten oder unüberwachten Klassifikationen durchgeführt. Dabei wird jedes Pixel einzeln betrachtet und nach

spektralen Eigenschaften in verschiedene Klassen eingeordnet. Die Vorgehensweise bei objektbasierten Verfahren ist in Abb. 6.5 graphisch veranschaulicht. In einem vorprozessierenden Schritt wird das Bild in homogene Bildbereiche eingeteilt, indem die Nachbarschaften der Bildpixel berücksichtigt werden, so dass Pixel mit ähnlichen Grauwerten eine Bildregion bilden [Koch u. a. 2003]. Anhand von extrahierten Objekteigenschaften, wie Form, Orientierung, Größe oder Position, kann im Anschluss an die Segmentierung die Klassifikation des Bildes über benutzerdefinierte Regeln durchgeführt werden [Jasani u. a. 2009].

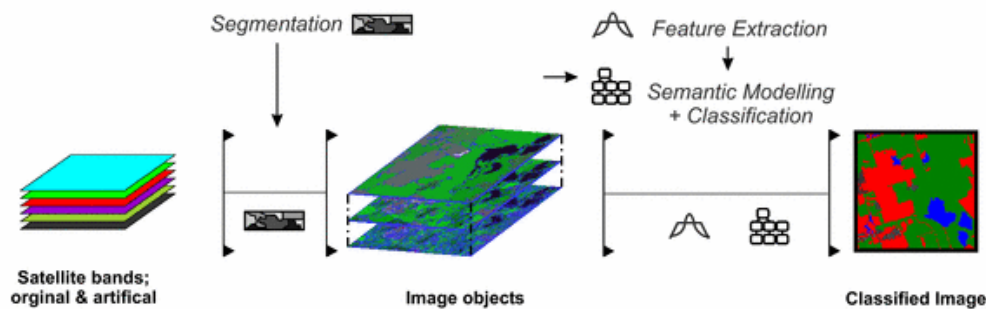


Abbildung 6.5 – Allgemeiner Ablauf bei der objektbasierten Bildanalyse [Jasani u. a. 2009]

Die über die Binärbildmasken gelieferten Informationen bezüglich des optischen Satellitenbildes können dazu verwendet werden, das objektbasierte Klassifikationsverfahren zu verbessern. Wird zur Vorsegmentierung das Wissen aus den generierten Layermasken verwendet, wird das Bild nicht nur in homogene Bildregionen aufgeteilt, sondern jeder Bildbereich besitzt zudem eine semantische Bedeutung. Folglich kann die objektbasierte Klassifikation über die a priori Informationen aus den Binärbildmasken auf einer aufschlussreicheren Datengrundlage durchgeführt werden.

6.3 Kombination von Optik und Radar

Liegt zusätzlich zu einer optischen Satellitenaufnahme ein Radarbild derselben Szene vor, können die aus GeoRaySAR und GeoRayOpt resultierenden Simulationsergebnisse miteinander kombiniert und die Szeneninterpretation angereichert werden. Für das gewählte Testgebiet München steht beispielsweise eine TSX Aufnahme zur Verfügung, die, genauso wie das WV2 Bild aus Abb. 4.13(a), das Stadtzentrum von München wiedergibt (vgl. Abb. 6.6 links unten). Durch die Gegenüberstellung des TSX und WV2 Satellitenbildes in Abb. 6.6 wird deutlich, dass dieselbe Szene im jeweils aufgenommenen Bild verschiedenartig dargestellt wird. Dies liegt zum einen an den unterschiedlichen Aufnahmeverfahren von Radarsensoren und optischen Sensoren. Bei Radar handelt es sich um ein aktives Verfahren, das weitgehend wetterunabhängig ist und auf kein Sonnenlicht angewiesen ist. Der Radarsensor misst seine Distanz zum Objekt am Boden und projiziert die erfassten Signalintensitäten in eine Azimut-Range-Ebene. Dem optischen Sensor hingegen liegt ein passives Aufnahmeverfahren zugrunde. Dadurch ist für dessen Bilderfassung eine Lichtquelle unabdingbar. Die optische Kamera führt Winkelmessungen durch und projiziert die Signalintensitäten über eine Zentralprojektion auf einen Sensor (z.B. CCD Sensor) [Tao u. a. 2011].

Zum anderen ist die verschiedenartige Darstellung sowohl auf den unterschiedlichen Abbildungseffekt der Gebäude im Bild als auch auf die verschiedenen Blick- und Einfallswinkel der beiden Satellitenaufnahmen zurückzuführen. In Tab. 6.1 sind die Unterschiede tabellarisch aufgeführt. Beim TSX Bild ist die Flugrichtung des Sensors mit der Blickrichtung \vec{X}_{LoS} gekoppelt, da diese senkrecht zur Flugrichtung verläuft. Das vorliegende Radarbild weist einen Azimutwinkel von $\alpha_{Se,SAR} = 188,34^\circ$ auf, wonach ein absteigender Orbit zugrunde liegt (vgl. Abschnitt 3.2.2 und Abb. 3.3(b)). Über die Berechnung in Formel 3.5 ergibt sich ein Blickwinkel von $\beta_{SAR} = 278,34^\circ$. Zur Veranschaulichung ist die Flugrichtung und der Blickrichtungsvektor in Abb. 6.1 in Bezug auf das TSX Satellitenbild in Rot eingezeichnet. Wie in Abb. 3.24 dargestellt, erfolgt bei Erfassung der Szene durch einen SAR Sensor die geometrische Überlagerung der Objekte entgegengesetzt zur Blickrichtung \vec{X}_{LoS} . Für das WV2 Bild ist die Flugrichtung des Satelliten während der Aufnahme nicht relevant, da die Bilderfassung unabhängig von dieser in verschiedene Richtungen erfolgen kann (vgl. Abb. 4.9). Im Gegensatz zum TSX Bild weist das optische Bild weitaus kleinere Aufnahmewinkel β und θ auf (vgl. Tab. 6.1). Der Blickrichtungsvektor des WV2 Sensors während der Bilderfassung ist ebenfalls in Abb. 6.6 rot eingezeichnet. Ein entscheidender Unterschied zur Radaraufnahme (TSX) liegt darin, dass der vertikale Lageversatz der Objekte im Satellitenbild in Blickrichtung des Sensors \vec{X}_{LoS} erfolgt (vgl. Abb. 6.6).

Tabelle 6.1 – Gegenüberstellung des TSX und WV2 Bildes der Frauenkirche in München

	TSX Satellitenbild	WV2 Satellitenbild
Blickwinkel β	278,34°	15,08°
Einfallswinkel θ	49,95°	15,96°
Azimutwinkel α_{Se}	188,34°	189,00°
Orbit	absteigend	absteigend
Lagerversatz	entgegengesetzt zur Blickrichtung	in Blickrichtung

Wie in Abb. 6.6 anhand der schwarzen Pfeile angedeutet, können durch die vorhandene Datengrundlage vier verschiedene Simulationen auf Basis unterschiedlicher DOM-Daten (LiDAR oder WV2) und Satellitenbilddaten (TSX und WV2) durchgeführt werden. Aufgrund der oben aufgeführten Unterschiede bezüglich der Abbildungsgeometrien und -verfahren von Radar und Optik resultieren differierende Simulationsergebnisse. Als Beispiel sind in Abb. 6.7 die simulierten Bilder des vorverarbeiteten WV2 DOMs (vgl. Abb. 6.6, rechts oben) auf Basis der TSX und WV2 Bildmetadaten dargestellt. Mittels der Simulationen anhand von TSX Bilddaten lassen sich sowohl die Einfach- als auch die Doppelreflexionen ableiten. Bei der Simulation auf Basis optischer Bilddaten hingegen kann die Lichtquelle variiert werden. Daher sind in den vier Graphiken und damit in den generierten Binärbildmasken verschiedene Bereiche der Szene abgebildet. Die abgeleiteten Informationen können sich zukünftig gegenseitig ergänzen, um die Szeneninterpretation noch weiter zu verfeinern.

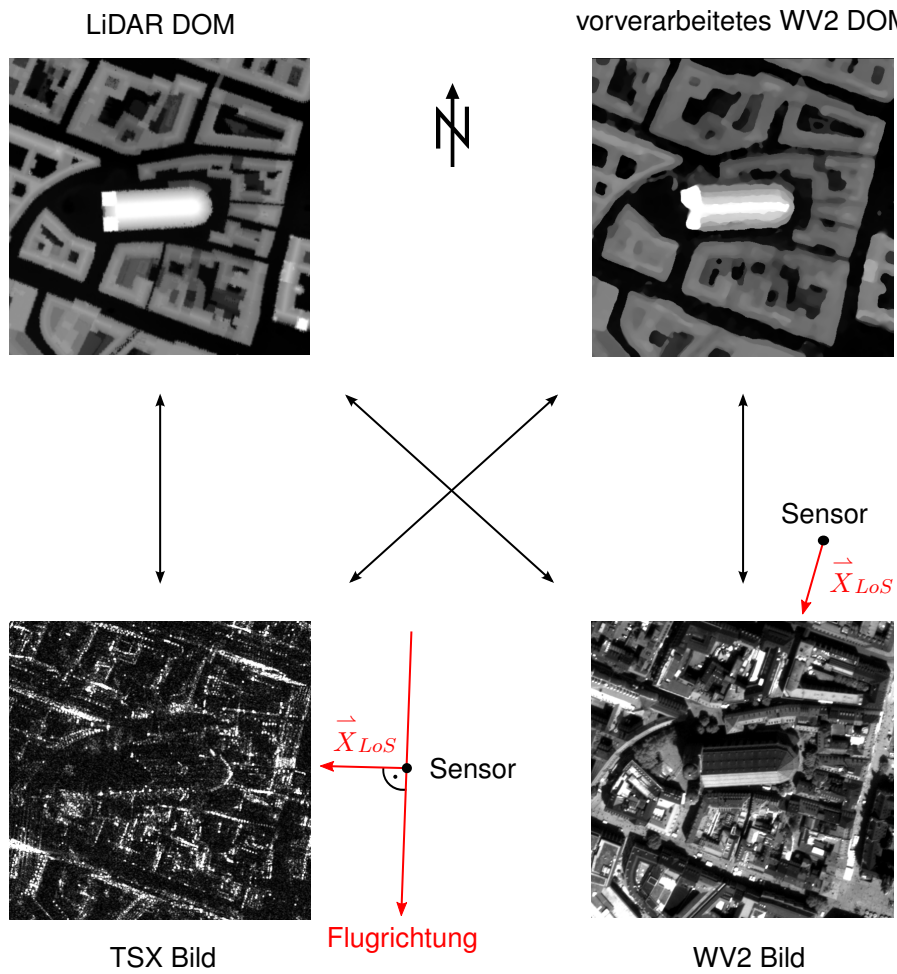
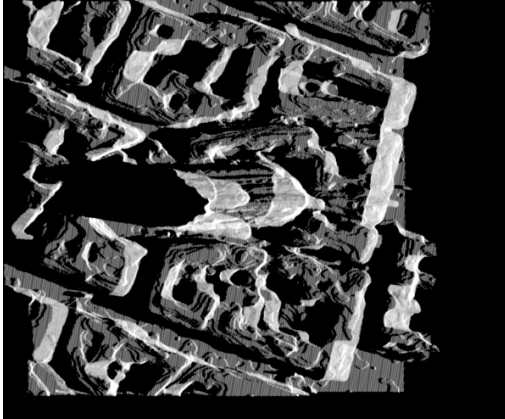
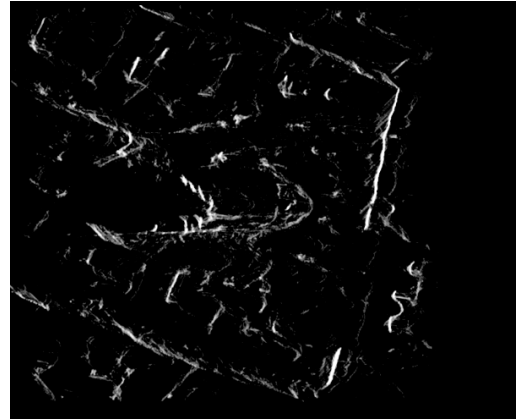


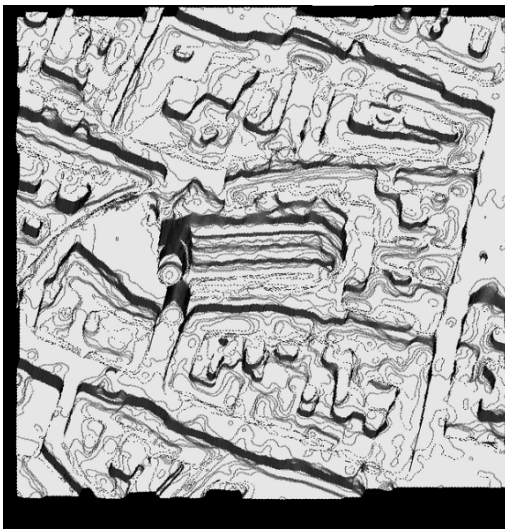
Abbildung 6.6 – Kombinationsmöglichkeiten von optischen Daten und Radardaten



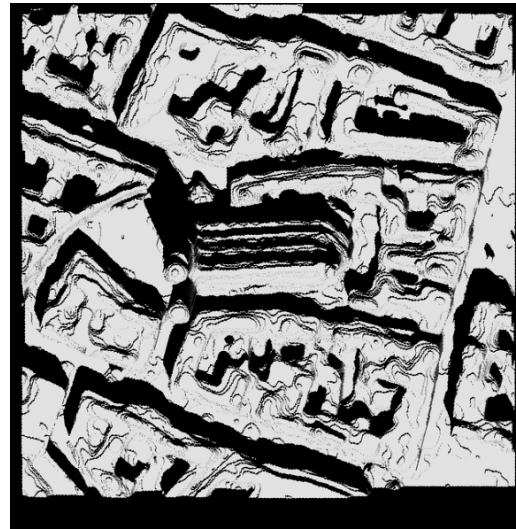
(a) Mit TSX Bilddaten simuliertes vorverarbeitetes WV2 DOM; Einfachreflexionen



(b) Mit TSX Bilddaten simuliertes vorverarbeitetes WV2 DOM; Doppelreflexionen



(c) Mit WV2 Bilddaten simuliertes vorverarbeitetes WV2 DOM; $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{Se}$



(d) Mit WV2 Bilddaten simuliertes vorverarbeitetes WV2 DOM; $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{wahr}$

Abbildung 6.7 – Simulationsergebnisse der Frauenkirche auf Basis von Bildmetadaten unterschiedlicher Sensoren

Kapitel 7

Zusammenfassung

In dieser Masterarbeit wird der bestehende Simulator GeoRaySAR, der auf Radarbilddaten basierende Simulationen ermöglicht, um die Funktionalität zur Durchführung von Simulationen optischer Bilddaten (GeoRayOpt) erweitert. Ein digitales 3D Modell liefert die Informationen bezüglich der Geometrie der zu simulierenden Szene. Die Aufnahmegeometrie wird durch die Metadaten des optischen Satellitenbildes beschrieben. Basierend auf diesen beiden Eingangsdaten liefert der Simulator GeoRayOpt geokodierte Bilder, die mit dem originalen optischen Satellitenbild verglichen werden können. Das schafft die Voraussetzung für eine Interpretation der Szene.

Neben der Ergänzung von GeoRaySAR um GeoRayOpt zu GeoRayImg werden die beiden Simulatoren, zusammen mit weiteren, zum Teil nicht in dieser Arbeit entwickelten Simulationsmodulen, in eine vollautomatische Simulationsumgebung integriert. Als Input in die Simulationsumgebung gehen dabei lediglich ein DOM und ein Satellitenbild ein. Aus dem DOM wird über das integrierte Vorverarbeitungsmodul von [Ilehag 2016] ein DGM und nDOM erstellt. Diese digitalen Modelle dienen anschließend als Input für GeoRayImg. Je nachdem, welcher Sensor der als Input gegebenen Satellitenaufnahme zugrunde liegt, wird automatisch entschieden, welcher Simulator (GeoRaySAR oder GeoRayOpt) zur Simulation von Bildern herangezogen wird. Durch mehrmaligen Aufruf des jeweiligen Simulators werden die verschiedenen digitalen Modelle (DOM, DGM und nDOM) basierend auf den Bildmetadaten der Satellitenaufnahme simuliert. Durch Kombination der unterschiedlichen Simulationsergebnisse werden im Anschluss Binärbildmasken erstellt. Aufgrund der in den beiden Simulatoren integrierten Geokodierung besitzen die generierten Binärbildmasken UTM Koordinaten. Die Masken liefern Informationen zur Ausdehnung und Position von Bildinhalten in der betrachteten Szene. Dadurch können verschiedenen Bildbereichen unterschiedliche Semantiken (z.B. Gebäudelayover, Boden, Schatten oder Vegetation) zugeordnet werden.

Fallstudien werden anhand der zur Verfügung stehenden Datensätze der Testgebiete München und Dongying (China) durchgeführt. Es kann festgestellt werden, dass mit der Genauigkeit der Datengrundlage die Qualität der Simulationsergebnisse und der daraus generierten Layermasken steigt. Außerdem ist es von Vorteil, wenn sowohl das DOM als auch die Satellitenaufnahme aus derselben Datenquelle hervorgehen. Grund hierfür ist, dass beiden Eingangsdatensätzen diesel-

be Lokalisationsgenauigkeit zugrunde liegt, die sich folglich auch in den Simulationsergebnissen widerspiegelt. Damit kann bei Vergleich der simulierten Bilder mit dem originalen optischen Satellitenbild eine fast fehlerfreie Überlagerung beobachtet werden. Da der Fokus dieser Masterarbeit auf der Detektion der Ausdehnung von Gebäuden in einer optischen Satellitenaufnahme liegt, wirken sich Objekte, die neben Gebäuden im DOM enthalten sind, negativ auf die Analyse von Gebäudebereichen aus. Solche Objekte können beispielsweise Bäume oder andere Arten von Vegetation im DOM darstellen. Dieses Problem ist auf eine unzureichende Filterung der Vegetation aus dem DOM zurückzuführen, was wiederum durch das Fehlen adäquater Multispektraldaten zu begründen ist.

Des Weiteren werden in dieser Arbeit Anwendungsmöglichkeiten für die aus der Simulationsumgebung resultierenden Ergebnisse erarbeitet. Dabei wird festgestellt, dass die Durchführung und damit die Ergebnisse von Veränderungsanalysen durch Einbindung der aus den Binärbildmasken resultierenden Informationen zukünftig verbessert werden können. Einerseits kann die zur Durchführung von Change Detections verwendete Datengrundlage optimiert werden. Andererseits ist es möglich, korrespondierende Gebäude in zwei zeitlich versetzten optischen Satellitenaufnahmen, denen eine unterschiedliche Abbildungsgeometrie und ein differierender Sonnenstand zugrunde liegt, eindeutig einander zuzuordnen. Außerdem können die geokodierten extrahierten Bildbereiche, die sich aus den Simulationsergebnissen des GeoRayOpt Simulators ergeben, zur Unterstützung einer objektbasierten Klassifikation herangezogen werden. Basierend auf den Simulationsergebnissen aus GeoRaySAR und GeoRayOpt ist es möglich, zukünftig sowohl Informationen aus Radarbildern als auch aus optischen Satellitenbildern zu extrahieren und diese miteinander zu kombinieren.

Kapitel 8

Ausblick

Abschließend werden fünf Aspekte vorgestellt, die in Anknüpfung an die vorliegende Masterarbeit durchgeführt und erarbeitet werden können.

8.1 Zukünftige Verwendung der Simulationsergebnisse

Wie in Kapitel 6 bereits aufgeführt, können die Simulationsergebnisse aus dem GeoRayOpt bzw. GeoRaySAR Simulator in Zukunft unterschiedliche Anwendungen finden. Werden die Ergebnisse in Anknüpfung an diese Masterarbeit in die Veränderungsanalyse implementiert, können die in Abschnitt 6.1 aufgeführten Thesen bezüglich der Verbesserung der Change Detection überprüft und bestätigt oder richtig gestellt werden. Außerdem können die Binärbildmasken, die sich aus den verschiedenen simulierten Bildern ergeben, zur objektbasierten Klassifikation herangezogen werden (vgl. Abschnitt 6.2). Des Weiteren ist es möglich, die Ergebnisse aus GeoRayOpt mit jenen aus GeoRaySAR zu kombinieren (vgl. Abschnitt 6.3). Dabei ist die Kombinierbarkeit der einzelnen Simulationsergebnisse und der daraus resultierende Nutzen für die Szeneninterpretation in einer Folgearbeit zu prüfen und zu testen.

8.2 Verbesserung der Simulationsergebnisse

Um die Simulationsergebnisse zu verbessern und noch aussagekräftiger zu gestalten, können zukünftig weitere Vor- und Nachverarbeitungsschritte vorgenommen werden. Da die Simulationsergebnisse von der Datengrundlage und damit vom zugrundeliegenden DOM abhängen, ist es wichtig, ein möglichst präzises DOM zur Verfügung zu haben. Aus diesem Grund kann das optische DOM, neben der Filterung und Rauscheliminierung (vgl. Anhang, [Ilehag 2016]), in Zukunft noch weiter optimiert werden. Außerdem können die erstellten Binärbildmasken zusätzlich zur Verwendung eines Medianfilters durch Anwendung morphologischer Operatoren nachgebessert werden.

8.3 Nachbearbeitung des nDOMs

Das in Abschnitt 5.1 (vgl. Abb. 5.3(e)) aufgezeigte Problem der ausgefranst Darstellung des auf Basis von WV2 Bilddaten simulierten optischen nDOMs kann zukünftig noch verbessert werden. Bisher wird an den Rändern des nDOMs anhand des morphologischen Operators *Dilatation* automatisch an jedem Pixel eine Erweiterung durchgeführt, um zu vermeiden, dass einzelne Teile von Gebäudefassaden im erzeugten nDOM nicht vorhanden sind [Ilehag 2016]. Diese Art der Nachbearbeitung kann zukünftig anders gestaltet werden, so dass keine so markanten Ausfransungen am nDOM mehr entstehen. Anstatt einer automatischen Erweiterung an der gesamten Umrandung des nDOMs kann punktuell für einzelne Pixel eine höhenabhängige Ergänzung durchgeführt werden, indem für jedes Pixel am Rand des nDOMs abgefragt wird, ob ein ergänzendes Pixel hinzugefügt werden soll oder nicht. Für diese Abfrage wird eine Maske mit einer bestimmten Größe von beispielsweise 3 x 3 oder 5 x 5 Pixel herangezogen und diese entlang des Randes des nDOMs verschoben. An jeder nDOM-Randstelle sollen die Höhenwerte der sich in der Maske befindlichen Pixel gerundet werden. Grund hierfür sind die von Pixel zu Pixel unterschiedlichen Höhen, die ab der vierten Nachkommastelle Abweichungen voneinander aufweisen. Die Rundung der Höhenwerte auf m-Größenordnung reicht dabei von der Genauigkeit her aus. Nachdem alle Höhenwerte innerhalb der Maske gerundet vorliegen, kann die Abfrage für eine Ergänzung um ein Pixel durchgeführt werden. Ein Beispiel einer Maske zur Anwendung einer *Dilatation* ist in Abb. 8.1 gegeben. Sind dabei alle gerundeten Höhenwerte in der Maske gleich (vgl. Abb. 8.1(a)) soll auf eine Erweiterung des Modells am Rand verzichtet werden. Weichen die zu jedem Pixel in der Maske zugehörigen Höhen jedoch wertmäßig voneinander ab (vgl. Abb. 8.1(b)), soll eine Ergänzung am Rand des nDOMs vorgenommen werden, da sich folglich Höhenwerte in der Maske befinden, die für die Erzeugung des nDOMs erhalten bleiben sollen. Die Ausweitung des nDOMs soll nur stattfinden, wenn es anhand der gerundeten Höhendefinitionen innerhalb der definierten *Dilatation*-Maske notwendig ist. Die Ausfransungen in Abb. 5.3(e) werden nach einer höhenabhängigen Ausweitung des nDOMs nicht mehr so stark ausgeprägt sein wie dies bei einer automatischen Ergänzung der Fall ist.

516	516	516
516	516	516
516	516	516

(a) 3 x 3 Maske bei der keine *Dilatation* vorgenommen wird

516	520	510
518	516	510
516	516	510

(b) 3 x 3 Maske bei der eine *Dilatation* vorgenommen wird

Abbildung 8.1 – Beispielmasken zur Entscheidung über die Durchführung einer *Dilatation* am nDOM

8.4 Erweiterung des Potentials von GeoRayImg

Neben Verwendung von DOMs, DGMs oder nDOMs als Grundlage für die Simulation von Bildern bestimmter Szenen können auch **City Geography Markup Language** (CityGML) Modelle als Input für den Simulator GeoRayImg dienen. Für eine Simulation mit Hilfe von SAR Bildmetadaten steht diese Möglichkeit in GeoRaySAR bereits zur Verfügung. Die Simulation auf Grundlage optischer hochauflösender Satellitendaten enthält die zusätzliche Option solcher GIS Daten noch nicht, so dass es in Zukunft möglich ist, den Simulator GeoRayOpt um diese Alternative zu ergänzen. Dadurch wird das Spektrum der verschiedenen Simulationsmöglichkeiten (vgl. Abb. 3.25) erweitert und der Simulator GeoRayImg gewinnt an Potential.

8.5 Objektbezogene Analyse von Einzelgebäuden

Wie bereits in Abschnitt 3.3 angesprochen, können Simulationen basierend auf den Metadaten von zwei unterschiedlich großen (Großes Modell \neq Kleines Modell) oder zwei gleich großen (Großes Modell = Kleines Modell) digitalen Modellen durchgeführt werden, da die jeweiligen Implementierungen dafür sowohl für SAR Bilder als auch für hochauflösende optische Satellitenaufnahmen zur Verfügung stehen. Wichtig ist dabei, dass zum einen das kleine Modell nie größer sein darf als das große Modell, zum anderen das kleine Modell im größeren enthalten sein muss. Außerdem muss die in Abschnitt 3.2 erstellte .pov Datei um die Translation zwischen den beiden Modellen ergänzt werden. Grund hierfür ist, dass dem Pixel in der linken oberen Ecke des simulierten kleinen Modells im lokalen Koordinatensystem der Wert (1, 1) zugewiesen wird. Somit liegt das simulierte Bild innerhalb der großen Szene nicht an der richtigen Stelle, sondern ist in dessen linken oberen Ecke gelagert. Folglich muss über eine in GeoRayImg zusätzlich aufgerufene Funktion die Translation des kleinen Modells innerhalb des großen Modells berechnet werden, um diese Information im Anschluss zur .pov Datei hinzuzufügen. Nur so ist es möglich, das in POV-Ray simulierte Bild des kleinen Modells in Bezug auf die gesamte Szene richtig zu lagern.

Da die Modelle ursprünglich im UTM Koordinatensystem gegeben sind und, wie in Tab. 4.5 und 4.7 angedeutet ist, in deren Metadaten die UTM Koordinaten der Mitte des linken oberen Pixels ($\vec{X}_{lo,gr} = (X_{lo,gr}, Y_{lo,gr}, Z_{lo,gr})$ und $\vec{X}_{lo,kl} = (X_{lo,kl}, Y_{lo,kl}, Z_{lo,kl})$) bekannt sind, können diese als Ausgangspunkt für die Berechnung der Translation verwendet werden. Wie in Abb. 8.2 dargestellt, wird dafür in beiden Modellen das lokale POV Koordinatensystem in der linken unteren Ecke gelagert. Im nächsten Schritt erfolgt die Umrechnung der gegebenen Koordinaten $\vec{X}_{lo,gr}$ und $\vec{X}_{lo,kl}$ in die entsprechenden POV Koordinaten $\vec{X}_{lu,gr} = (x_{lu,gr}, y_{lu,gr}, z_{lu,gr})$ und $\vec{X}_{lu,kl} = (x_{lu,kl}, y_{lu,kl}, z_{lu,kl})$ in der linken unteren Ecke der beiden Modelle. Ebenso wie die Parameterdefinitionen bezüglich des Sensors, der Lichtquelle und des Modells in Abschnitt 3.2.3 müssen jene in Bezug auf die Translation zwischen dem großen und kleinen Modell im lokalen POV Koordinatensystem vorgenommen werden.

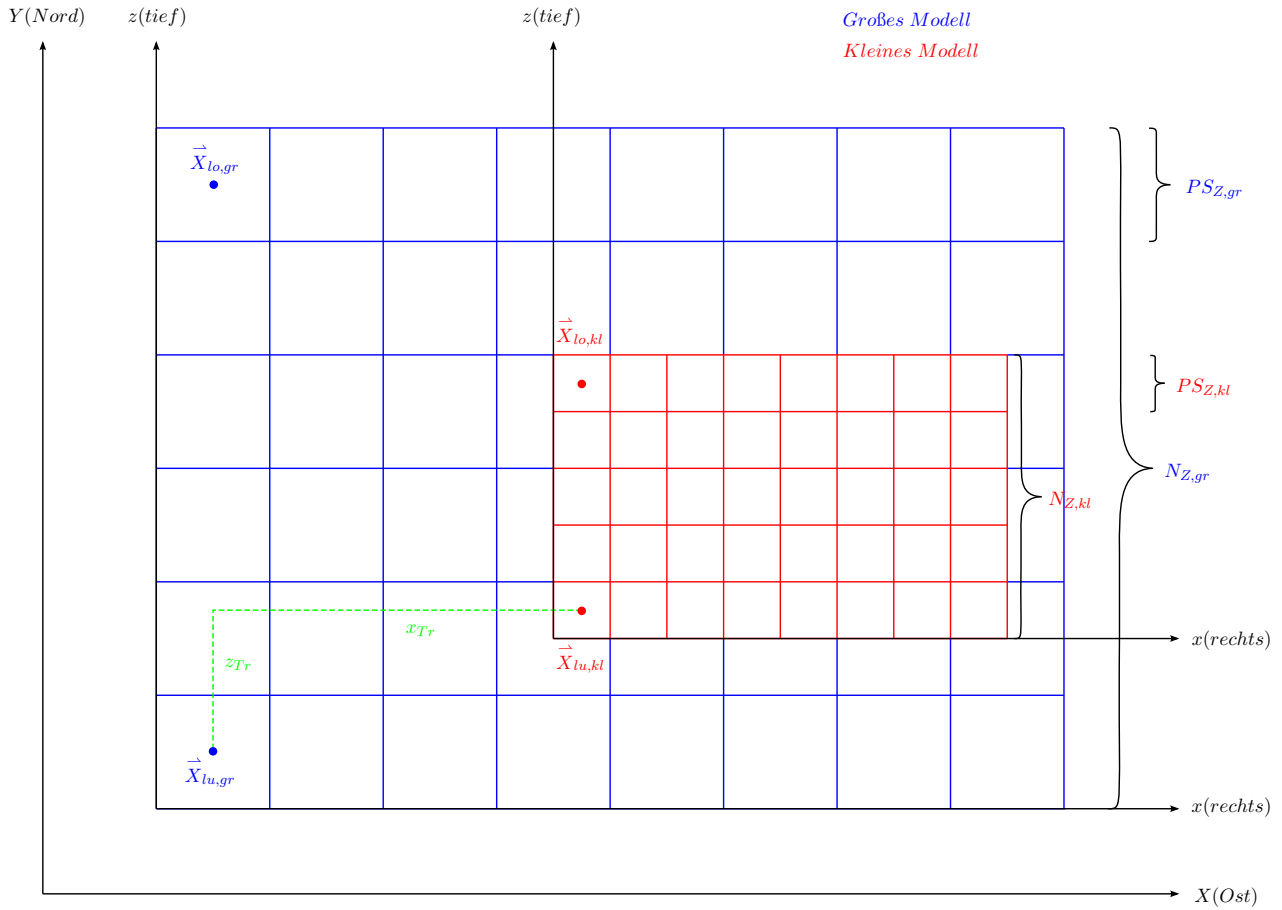


Abbildung 8.2 – Translation bei Simulation auf Basis der Metadaten zweier unterschiedlicher großer digitaler Modelle

Aufgrund der Tatsache, dass die Definitionen der ebenen Koordinatenachsen des UTM und POV Koordinatensystems nicht identisch sind (vgl. Abb. 8.2), können die POV Koordinaten der linken unteren Ecke nach den in Formel 8.1 gezeigten Berechnungen ermittelt werden. Die dafür nötigen Informationen begrenzen sich neben den oben erwähnten UTM Koordinaten $X_{lo,gr}$, $Y_{lo,gr}$, $X_{lo,kl}$ und $Y_{lo,kl}$ sowohl auf die Zeilenpixelanzahl des großen und kleinen Modells $N_{Z,gr}$ und $N_{Z,kl}$ als auch auf die Zeilenpixelauflösung $PS_{Z,gr}$ und $PS_{Z,kl}$ der beiden Modelle.

$$\begin{aligned}
 x_{lu,gr} &= X_{lo,gr} & \text{m} \\
 z_{lu,gr} &= Y_{lo,gr} - ((N_{Z,gr} - 1) \cdot PS_{Z,gr}) & \text{m} \\
 x_{lu,kl} &= X_{lo,kl} & \text{m} \\
 z_{lu,kl} &= Y_{lo,kl} - ((N_{Z,kl} - 1) \cdot PS_{Z,kl}) & \text{m}
 \end{aligned} \tag{8.1}$$

Durch Differenzbildung der soeben bestimmten POV Koordinaten kann die in Abb. 8.2 grün eingezeichnete Translation entlang der x -Achse x_{Tr} und der z -Achse z_{Tr} des POV Koordinatensystems errechnet werden (vgl. Formel 8.2). Der Vollständigkeit halber ist in Formel 8.2 auch die Translation entlang der y -Achse aufgeführt. Diese weist jedoch den Wert Null auf, da es sich lediglich um eine

Verschiebung innerhalb der x - z -Ebene handelt.

$$\begin{aligned} x_{Tr} &= x_{lu,kl} - x_{lu,gr} & \text{m} \\ y_{Tr} &= 0 & \text{m} \\ z_{Tr} &= z_{lu,kl} - z_{lu,gr} & \text{m} \end{aligned} \tag{8.2}$$

Wird die zusätzlich in der .pov Datei enthaltene Translation (x_{Tr}, y_{Tr}, z_{Tr}) bei der Simulation auf Basis der Metadaten zweier unterschiedlich großer Modelle berücksichtigt, kommt es zu einer richtigen Positionierung des kleinen Modells innerhalb der großen Bezugsszene.

Anwendung kann die Simulation auf Basis von Daten zweier unterschiedlich großer Modelle bei einer objektbezogenen Analyse von Einzelgebäuden finden [Tao u. a. 2014]. Wird beispielsweise das in Abb. 4.19(b) dargestellte nDOM des Münchner Stadtzentrums betrachtet, kann dieses zur Extraktion von Einzelgebäuden der Szene verwendet werden. Überschreitet die Anzahl an Pixeln, die ein Objekt im nDOM darstellen, einen bestimmten Schwellwert (z.B. 1500 Pixel), wird das Objekt als Gebäude eingestuft und aus dem nDOM extrahiert [Tao u. a. 2014]. Wird im Anschluss in einem ersten Durchlauf des Simulators GeoRayImg das Zentrum Münchens in Bezug auf dasselbe simuliert und in einem zweiten Durchlauf eine Simulation eines Einzelgebäudes bezüglich des Münchner Zentrums durchgeführt, können die Informationen aus den jeweiligen simulierten Ergebnissen gemeinsam genutzt werden. Da die lokalen Binärbildmasken des Einzelgebäudes den Einfluss benachbarter Gebäude nicht beinhaltet, werden die global erstellten Layer der gesamten Szene herangezogen [Tao u. a. 2014]. Durch Kombination der lokalen und globalen Masken kann die Sichtbarkeit des Gebäudes im Satellitenbild überprüft werden. Dabei kann herausgefunden werden, ob das Gebäude sichtbar ist und wenn ja wie viel des Gebäudes in der Szene erkennbar ist. Es wird eine Identifikation von einzelnen Gebäudebereichen, die im gesamten simulierten Bild des Münchner Zentrums durch die dichte Bebauung von benachbarten Bauwerken verdeckt sind, ermöglicht. Die eben beschriebene objektbezogene Analyse auf Basis optischer Bilddaten kann in einer Folgearbeit durchgeführt, getestet und analysiert werden.

Literaturverzeichnis

- [Airbus 2016] AIRBUS ; AIRBUS DEFENCE AND SPACE GMBH (Hrsg.): *Satellite Image Pléiades 1B Multispectral 0.5m Date: 2013, October 18th: ID: DS_PHR1B_201310180300155_SE1_PX_E118N37_0911_01350*. http://www.intelligence-airbusds.com/satellite-image/?id=DS_PHR1B_201310180300155_SE1_PX_E118N37_0911_01350. Version: 2016
- [Arefi u. a. 2009] AREFI, H. ; D'ANGELO, P. ; MAYER, H. ; REINARTZ, P.: Automatic generation of digital terrain models from CARTOSAT-1 stereo images. In: *ISPRS, Hannover, 2009* (2009)
- [Auer 2011] AUER, S.: 3D Synthetic Aperture Radar Simulation for Interpreting Complex Urban Reflection Scenarios. (2011), Nr. Reihe C, Heft Nr. 660
- [Auer u. a. 2010] AUER, S. ; HINZ, S. ; BAMLER, R.: Ray-Tracing Simulation Techniques for Understanding High-Resolution SAR Images. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 48, no. 3, March 2010* (2010), pp. 1445–1456. <http://ieeexplore.ieee.org>
- [Bräuninger 2013] BRÄUNINGER, S. ; HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN MÜNCHEN (Hrsg.): *Erfassung von Verkehrsdaten aus monotemporalen Satellitenbildaufnahmen: Analysis of traffic parameters in monotemporal satellite images: Bachelorarbeit*. München, 2013
- [Brunner u. a. 2011] BRUNNER, D. ; LEMOINE, G. ; GREIDANUS, H. ; BRUZZONE, L.: Radar Imaging Simulation for Urban Structures. In: *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 8, No. 1, January 2011* (2011), 68–72. <http://ieeexplore.ieee.org>
- [Cheng u. a. 2016] CHENG, P. ; TOUTIN, T. ; ZHANG, Y. ; WOOD, M.: QuickBird - Geometric Correction, Path and Block Processing and Data Fusion. (2016). http://www.pcigeomatics.com/pdf/eom_quickbird_2003.pdf
- [Dial u. Grodecki 2005] DIAL, G. ; GRODECKI, J.: RPC Replacment Camera Models. In: *ASPRS Annual Conference "Geospatial Goes Global: From Your Neighborhood to the Whole Planet", March 7 - 11, 2005* (2005)
- [DigitalGlobe 2014] DIGITALGLOBE: *Imagery Support Data (ISD) Documentation: DigitalGlobe Imagery Support Data (ISD) Documentation: v. 1.1.2*. 2014
- [DigitalGlobe 2015a] DIGITALGLOBE ; SATELLITE IMAGING CORPORATION (Hrsg.): *Pleiades-1B Satellite Sensor*. <http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/pleiades-1b/>. Version: 2015

- [DigitalGlobe 2015b] DIGITALGLOBE ; SATELLITE IMAGING CORPORATION (Hrsg.): *WorldView-2 Satellite Sensor*. <http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/worldview-2/>. Version:2015
- [DigitalGlobe 2016] DIGITALGLOBE ; DIGITALGLOBE (Hrsg.): *Geolocation Accuracy of WorldView Products*. http://global.digitalglobe.com/sites/default/files/WorldView_Geolocation_Accuracy.pdf. Version:2016
- [Doxygen 2016] DOXYGEN: *GDAL - Geospatial Data Abstraction Library*. <http://www.gdal.org/>. Version:2016
- [Easson u. a. 2010] EASSON, G. ; DELOZIER, S. ; MOMM, H. G.: Estimating Speed and Direction Of Small Dynamic Targets through Optical Satellite Imaging. In: *Remote Sensing Journal* (2010), 1331–1347. www.mdpi.com/journal/remotesensing
- [ESA 2016a] ESA ; EOPORTAL DIRECTORY, SHARING EARTH OBSERVATION RESOURCES (Hrsg.): *Pleiades-HR (High-Resolution Optical Imaging Constellation of CNES)*. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/content/-/article/pleiades>. Version:2016
- [ESA 2016b] ESA ; EOPORTAL DIRECTORY, SHARING EARTH OBSERVATION RESOURCES (Hrsg.): *QuickBird-2*. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/q/quickbird-2>. Version:2016
- [ESA 2016c] ESA ; EOPORTAL DIRECTORY, SHARING EARTH OBSERVATION RESOURCES (Hrsg.): *WorldView-2*. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/v-w-x-y-z/worldview-2>. Version:2016
- [EUSI 2016] EUSI ; GOOGLE (Hrsg.): *Aufnahmenkatalog des European Space Imaging (EUSI)*. <http://iohs.euspaceimaging.com/smartsearch#googleSearch>. Version:2016
- [Fruth 2016] FRUTH, M. ; MAX FRUTH GMBH SOFTWAREENTWICKLUNG UND SYSTEMANALYSE (Hrsg.): *Bildanalyse & Verarbeitung*. <http://www.fruth.de/imgproc/xdibias.html>. Version:2016
- [Geiß u. a. 2015] GEISS, C. ; PELIZARI, P. A. ; MARCONCINI, M. ; SENGARA, W. ; EDWARDS, M. ; LAKES, T. ; TAUBENBÖCK, H.: Estimation of seismic building structural types using multi-sensor remote sensing and machine learning techniques. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 104* (2015), 175–188. www.elsevier.com/locate/isprsjprs
- [Global Scan Technologies 2015] GLOBAL SCAN TECHNOLOGIES ; GLOBAL SCAN TECHNOLOGIES (Hrsg.): *Pléiades 1B*. <http://www.gstdubai.com/satelliteimagery/pleiades-1b.html>. Version:2015
- [Guida u. a. 2008] GUIDA, R. ; IODICE, A. ; ROCCIO, D. ; STILLA, U.: Model-Based Interpretation of High-Resolution SAR Images of Building. In: *IEEE Journal of selected Topics in applied Earth Observations and Remote Sensing, Vol. 1, No. 2, June 2008* (2008), 107–119. <http://ieeexplore.ieee.org>

- [Ilehag 2016] ILEHAG, Rebecca ; DIVISION OF GEOINFORMATICS, SCHOOL OF ARCHITECTURE AND THE BUILT ENVIRONMENT KTH, ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY (Hrsg.): *Exploitation of digital Surface Models from Optical Satellites for the Identification of Buildings in High Resolution SAR Imagery: Master's Thesis*. München, 2016
- [Jasani u. a. 2009] JASANI, B. ; NIEMEYER, I. ; NUSSBAUM, Sven ; RICHTER, B. ; STEIN, G.: *International safeguards and satellite imagery: Key features of the nuclear fuel cycle and computer-based analysis*. Berlin and London : Springer, 2009. – ISBN 978–3–540–79131–7
- [Koch u. a. 2003] KOCH, B. ; JOCHUM, M. ; IVITS, E. ; DEES, M. ; ALBERT-LUDIGWS-UNIVERSITÄT FREIBURG (Hrsg.): *Pixelbasierte Klassifizierung im Vergleich und zur Ergänzung zum objektbasierten Verfahren*. 2003
- [Krauß 2014] KRAUSS, T.: Exploiting satellite focal plane geometry for automatic extraction of traffic flow from single optical satellite imagery. In: *ISPRS Technical Commission I Symposium, 17 - 20 November 2014* (2014), 179–187. <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-1/179/2014/isprsarchives-XL-1-179-2014.pdf>
- [Le Gall 2016] LE GALL, J. ; CNES - CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES (Hrsg.): *Pléiades: Two satellites to observe Earth close up*. <https://pleiades.cnes.fr/en/PLEIADES/index.htm>. Version: 2016
- [Leichtle 2016] LEICHTLE, T. ; DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT E.V. (DLR), DEUTSCHES FERNERKUNDUNGSDATENZENTRUM (Hrsg.): *Bilder zur Szene Dongying*. 2016
- [Leichtle u. a. 2016] LEICHTLE, T. ; GEISS, C. ; WURM, M. ; LAKES, T. ; TAUBENBÖCK, H.: Unsupervised change detection in VHR remote sensing imagery – an object-based clustering approach in a dynamic urban environment. In: *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 54 (2016), 15–27. www.elsevier.com/locate/jap
- [Lohmüller 2006a] LOHMÜLLER, F. A.: *Geometrische Transformationen in POV-Ray: "rotate" = rotieren, drehen um eine oder mehrere Koordinatenachsen*. http://www.f-lohmueller.de/pov_tut/trans/trans_200d.htm. Version: 2006
- [Lohmüller 2006b] LOHMÜLLER, F. A.: *Gestaltung von Oberflächen mit POV-Ray: Zum Syntax von "texture"*. http://www.f-lohmueller.de/pov_tut/tex/tex_400d.htm. Version: 2006
- [Lohmüller 2010] LOHMÜLLER, F. A.: *Einführung in die Beschreibungssprache des Raytracers POV-Ray; Kameras, Lichtquellen und Details in POV-Ray: Typen von Lichtquellen*. http://www.f-lohmueller.de/pov_tut/camera_light/light_d1.htm. Version: 2010
- [Müller 2016] MÜLLER, R. ; DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT E.V. IN DER HELMHOLTZ-GEMEINSCHAFT, EARTH OBSERVATION CENTER (Hrsg.): *XDibias - Bildverarbeitung*. http://www.dlr.de/eoc/desktopdefault.aspx/tabid-5461/10052_read-20901/. Version: 2016

- [Pacifici u. Navulur 2011] PACIFICI, F. ; NAVULUR, K. ; DIGITALGLOBE (Hrsg.): *Very High Spatial Resolution Imagery for Urban Applications*. <http://earthzine.org/2011/06/27/very-high-spatial-resolution-imagery-for-urban-applications/>. Version:2011
- [Persistence of Vision Raytracer Pty. Ltd. 2008] PERSISTENCE OF VISION RAYTRACER PTY. LTD. ; PERSISTENCE OF VISION RAYTRACER PTY. LTD. (Hrsg.): *Persistenec of Vision*. <http://www.povray.org/>. Version:2008
- [Poznanska 2013] POZNANSKA, A. M. ; DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT (DLR E.V.), ABTEILUNG SENSOR KONZEPTE UND ANWENDUNGEN AM INSTITUT FÜR OPTISCHE INFORMATIONSSYSTEME (Hrsg.): *Bestimmung von Gebäude- und Vegetationshöhen im Berliner Stadtgebiet: Ergebnisdokumentation*. http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/download/0610_Ausgabe2013_Endbericht_Gebaeude_Vegetationshoehen_Berlin.pdf. Version:2013
- [Rodgers 2014] RODGERS, A. P.: *CUDA Ray Tracer: Project Final Report*. 2014
- [Schindler 2016] SCHINDLER, K. ; EIDGENÖSSISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE ZÜRICH (ETH ZÜRICH), CHAIR OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING (Hrsg.): *Rational Polynomial Coefficients: Powerpoint Präsentation*. https://www1.ethz.ch/igp/photogrammetry/education/lehrveranstaltungen/Photo2_FS15/course/05_rpc.pdf. Version:2016
- [Stätter 2009] STÄTTER, R. ; DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT E.V. IN DER HELMHOLTZ-GEMEINSCHAFT (Hrsg.): *Die XDibias-Struktur*. Folie 1-8. Weßling, 2009
- [Tao 2015] TAO, J.: *Reihe C. Bd. 747: Combination of LiDAR and SAR data with simulation techniques for image interpretation and change detection in complex urban scenarios: Dissertation*. Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission beim Verlag C. H. Beck, 2015 <http://dgk.badw.de/index.php?id=12>. – ISBN 978–3–7696–5159–1
- [Tao u. Auer 2016] TAO, J. ; AUER, S.: Simulation-Based Building Change Detection From Multiangle SAR Images and Digital Surface Models. In: *IEEE Journal of selected Topics in applied Earth Observations and Remote Sensing, Vol. 9, No. 8, August 2016* (2016), 3777–3791. <http://ieeexplore.ieee.org>
- [Tao u. a. 2014] TAO, J. ; AUER, S. ; PALUBINSKAS, G. ; REINARTZ, P. ; BAMLER, R.: Automatic SAR Simulation Technique for Object Identification in Complex Urban Scenarios. In: *IEEE Journal of selected Topics in applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 7, no. 3, March 2014* (2014), 994–1003. <http://ieeexplore.ieee.org>
- [Tao u. a. 2011] TAO, J. ; PALUBINSKAS, G. ; REINARTZ, P. ; AUER, S.: Interpretation of SAR images in urban areas using simulated optical and radar images. In: *IEEE Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE), April 11-13, 2011, Munich, Germany* (2011), 41–44. <http://ieeexplore.ieee.org>

-
- [Tao u. Yu 2011] TAO, J. ; YU, W.: *A Preliminary Study on Imaging Time Difference Among Bands of Worldview-2 and Its Potential Applications: Joint Agency Commercial Imagery Evaluation; Civil Commercial Imagery Evaluation Workshop*. https://calval.cr.usgs.gov/JACIE_files/JACIE11/Presentations/WedPM/315_Tao_JACIE_11.137.pdf. Version:2011
- [Theis 2014] THEIS, T.: *Einstieg in Python*. 4., aktualisierte und erw. Aufl. Bonn : Galileo Press, 2014 (Galileo Computing). – ISBN 978–3–8362–2861–9
- [Updike u. Comp 2010] UPDIKE, T. ; COMP, C. ; DIGITALGLOBE (Hrsg.): *Radiometric Use of WorldView-2 Imagery: Technical Note: Revision 1.0*. http://www.pancroma.com/downloads/Radiometric_Use_of_WorldView-2_Imagery.pdf. Version:2010

Abbildungsverzeichnis

1.1	Frauenkirche im Zentrum Münchens	2
2.1	Prozesskette der vollautomatischen Simulation in GeoRaySAR	8
2.2	Layergenerierung mittels verschiedener Simulationsergebnisse aus GeoRaySAR am Beispiel der Alten Pinakothek in München	9
2.3	Ray Tracing	12
2.4	Schematische Darstellung der Funktionsweise des RPC Kameramodells	13
3.1	Ablauf der vollautomatischen Simulationsumgebung	16
3.2	Generierung eines 3D Modells aus dem 2,5D Bild des Modells	18
3.3	Flugrichtung eines Satelliten bezüglich Nord	21
3.4	Prinzip zur Ermittlung des Sensorsehstrahls während der Bilderfassung	22
3.5	Winkelberechnung im UTM Koordinatensystem	24
3.6	Einfallswinkel am Sensor θ_{Se} und Einfallswinkel am Boden θ_{Bo}	25
3.7	Höhenbestimmung des Sensors über dem Zentrum der Modellbox	27
3.8	Orientierung der Rechtswert-Bildachse \vec{X}_{RBa} in der UTM X - Y -Ebene	27
3.9	Berechnung der Breite des zu simulierenden Bildes B_{Simu}	28
3.10	Raumbildebene mit Rechtswert-Bildachse \vec{X}_{RBa} und Hochwert-Bildachse \vec{X}_{HBa}	29
3.11	Berechnung der Höhe des zu simulierenden Bildes H_{Simu}	29
3.12	Berechnung der Pixelauflösung des zu simulierenden Bildes	30
3.13	Punktförmige Lichtquelle mit parallelen Strahlen im POV Koordinatensystem	31
3.14	Zwei verschiedene Definitionen der Sonnenposition im POV Koordinatensystem	32
3.15	Berechnung der Sonnenposition zum Zeitpunkt der Satellitenbildaufnahme	32
3.16	Schritte für die Einstellung der Aufnahmegeometrie in POV-Ray	33

3.17 Rotation des Modells	35
3.18 Geokodierung des in POV-Ray gerenderten Bildes	37
3.19 Überlagerung der Modellbox aufgrund des schräg blickenden Sensors	39
3.20 Abbildung der Objekte im simulierten Bild	40
3.21 Berechnung der UTM Koordinaten des Pixels in der linken oberen Ecke des simulierten Bildes	42
3.22 Berücksichtigung verschiedener Projektionsebenen bei der Geokodierung: Versatz bei Simulation auf Basis von optischen Bilddaten	44
3.23 Veranschaulichung der Berechnungen zur Korrektur der Geokodierung	46
3.24 Berücksichtigung verschiedener Projektionsebenen bei der Geokodierung: Versatz bei Simulation auf Basis von SAR Bilddaten	47
3.25 Übersicht über Kombinationsmöglichkeiten der Simulationsparameter in GeoRayImg (GeoRaySAR + GeoRayOpt)	48
4.1 QB2 Satellit	51
4.2 Spektralbereich des QB2 Satelliten	52
4.3 Aufnahmeprinzip eines Zeilenscanners	53
4.4 PHR1B Satellit	53
4.5 Konstellation der beiden Pléiades Satelliten	53
4.6 WV2 Satellit	54
4.7 Spektralbereich des WV2 Satelliten	55
4.8 Aufbau der Brennebene des WV2 Zeilenscanners	56
4.9 Aufbau der WV2 Satellitenkamera	56
4.10 Bestimmung des CE90	57
4.11 Horizontale Lokalisationsgenauigkeit für <i>Ortho Ready Standard</i> Produkte des WV2 Sensors	57
4.12 DOMs des Testgebiets München	58
4.13 Optische WV2 Bilder des Testgebiets München	60
4.14 Unbearbeitetes PHR1B DOM des Testgebiets Dongying	62
4.15 Optische Level 2 Bilder des Testgebiets Dongying	64
4.16 Drei digitale Modelle: DOM (blau), DGM (rot) und nDOM (magenta)	66
4.17 DGMs der beiden Testgebiete	67

4.18 Vorverarbeitung der DOMs der beiden Testgebiete	69
4.19 nDOMs der beiden Testgebiete	70
5.1 Simulationsergebnisse für DOMs der Frauenkirche basierend auf WV2 Bilddaten . .	73
5.2 Mit WV2 Bilddaten simulierte Ebenen der Frauenkirche zur Ausschaltung der Unregelmäßigkeiten in den DGMs für eine bessere Hintergrunddarstellung bei der Layergenerierung	74
5.3 Simulationsergebnisse für nDOMs der Frauenkirche basierend auf WV2 Bilddaten .	75
5.4 Gebäudelayerovermasken $BM_{Lay,Geb}$	78
5.5 Ausgeschnittene Gebäudelayeroverbereiche im WV2 Satellitenbild	79
5.6 Bodenmasken BM_{Bo}	80
5.7 Ausgeschnittene Bodenbereiche im WV2 Satellitenbild	81
5.8 Schattenmasken BM_{Sch} und ausgeschnittene Schattenbereiche im WV2 Satellitenbild	82
5.9 Gebäudeschattenmasken $BM_{Sch,Geb}$ und ausgeschnittene Gebäudeschattenbereiche im WV2 Satellitenbild	83
5.10 Bodenschattenmasken $BM_{Sch,Bo}$ und ausgeschnittene Bodenschattenbereiche im WV2 Satellitenbild	84
5.11 Farblich unterteilte Schattenmaske BM_{Sch}	85
5.12 Nullwertmasken BM_{KW} und ausgeschnittene Nullwertbereiche im WV2 Satellitenbild	87
5.13 Unbearbeitete Vegetationslayerovermaske $BM_{Lay,Veg}$	88
5.14 Vegetationsmasken $BM_{Lay,Veg}$ und $BM_{Sch,Veg}$ und die zugehörigen ausgeschnittenen Bereiche im WV2 Satellitenbild	89
5.15 Farblich unterteilte Vegetationsmaske BM_{Veg}	90
5.16 Szeneninterpretation durch die auf WV2 Bilddaten basierenden Layermasken	91
5.17 Simulationsergebnisse des vorverarbeiteten PHR1B DOMs und nDOMs von Dongying; $\vec{X}_{So} = \vec{X}_{wahr}$	93
5.18 Fehlerhaft detektierte Gebäudelayeroverbereiche aufgrund von Vegetation im DOM . .	97
6.1 Zeitliche Veränderung des Testgebiets Dongying	99
6.2 Optische Satellitenbilder von Dongying mit Gebäudepolygonen überlagert	101
6.3 nDOMs von <i>Astrium</i> (linke Spalte) und vom IMF-PBA des DLR (rechte Spalte) mit Gebäudepolygonen überlagert	103
6.4 Verwendung verschiedener Layer zur Verbesserung von Veränderungsanalysen . .	104

6.5	Allgemeiner Ablauf bei der objektbasierten Bildanalyse	106
6.6	Kombinationsmöglichkeiten von optischen Daten und Radardaten	108
6.7	Simulationsergebnisse der Frauenkirche auf Basis von Bildmetadaten unterschiedlicher Sensoren	109
8.1	Beispielmasken zur Entscheidung über die Durchführung einer <i>Dilatation</i> am nDOM	114
8.2	Translation bei Simulation auf Basis der Metadaten zweier unterschiedlicher großer digitaler Modelle	116

Tabellenverzeichnis

3.1	Tabellarischer Aufbau der Pixelhöhenwerte des Modells in der .pov Datei	19
3.2	Vier Beispiele zur Ermittlung der UTM Koordinaten des Pixels in der nordwestlichen Ecke des simulierten Bildes	42
3.3	Vier Beispiele zur Ermittlung der georeferenzierten UTM Koordinaten des Pixels in der nordwestlichen Ecke des simulierten Bildes für Fall ① $H_{diff} > 0$ m	45
3.4	Vier Beispiele zur Ermittlung der georeferenzierten UTM Koordinaten des Pixels in der nordwestlichen Ecke des simulierten Bildes für Fall ② $H_{diff} < 0$ m	45
4.1	Wellenlängenbereich der Spektralbänder des QB2 Satelliten	52
4.2	Wellenlängenbereich der Spektralbänder des PHR1B Satelliten	54
4.3	Wellenlängenbereich der Spektralbänder des WV2 Satelliten	55
4.4	Horizontale Lokalisationsgenauigkeit der drei optischen Sensoren	56
4.5	Metadaten der DOMs des Testgebiets München	59
4.6	Metadaten der optischen Satellitenbilder des Testgebiets München	61
4.7	Metadaten des DOMs des Testgebiets Dongying	63
4.8	Metadaten der optischen Satellitenbilder des Testgebiets Dongying	65
5.1	Parametereinstellungen für Reflexionen an Objektoberflächen	71
5.2	Datenkombinationen zur Durchführung von Simulation für das Testgebiet Dongying .	91
6.1	Gegenüberstellung des TSX und WV2 Bildes der Frauenkirche in München	107

Anhang

A Vorprozessierung nach [Ilehag 2016]

In diesem Abschnitt wird kurz auf die Vorprozessierungsschritte eingegangen, die in [Ilehag 2016] entwickelt wurden und in der vorliegenden Masterarbeit Anwendung finden. Eine detaillierte Beschreibung muss in [Ilehag 2016] nachgelesen werden.

1. Schritt: DGM Generierung

Unter Verwendung des XDibias Moduls *dsm2dtm* wird aus einem DOM ein DGM berechnet. Dabei werden alle sich über dem Gelände befindenden Objekte aus dem DOM entfernt. Da jedoch der in [Arefi u. a. 2009] beschriebene zugrundeliegende Algorithmus für Gebäude, die sich am Rand des DOMs befinden, Probleme bei der DGM Generierung aufweist, wird vor der Berechnung des DGMs eine Vergrößerung des DOMs um drei Pixel vorgenommen. Diesen Pixeln wird die mittlere Höhe des DOMs zugewiesen. Somit befinden sich die Gebäude nicht mehr direkt am Rand des DOMs, wodurch eine Elimination aller Gebäude aus dem DOM möglich wird. Anschließend wird die zuvor durchgeführte Pixelerweiterung des DOMs wieder rückgängig gemacht. Da durch die Entfernung von Objekten im generierten DGM Lücken entstehen, müssen diese im Anschluss durch Interpolation geschlossen werden. Dafür wird ein ebenfalls von XDibias bereitgestelltes Modul namens *interpolation* herangezogen.

2. Schritt: Filterung optischer DOMs

Grundlegendes Ziel bei der Filterung eines optischen DOMs ist es, die für eine Analyse von Gebäuden störenden Effekte, wie Vegetation und Rauschen, aus dem DOM zu entfernen, so dass lediglich die Objekte im Modell enthalten sind, die von Interesse sind (Gebäude). Die dafür notwendigen Eingangsdaten sind ein vorzugsweise orthorektifiziertes optisches Multispektralbild und das zu verarbeitende DOM, welche beide dieselbe Szene abbilden und die gleiche geometrische Auflösung und Größe aufweisen müssen.

Die Entfernung von Vegetation im DOM findet zum einen anhand des NDVIs statt. Wie in

$$NDVI = \frac{RE - R}{RE + R}$$

zu sehen ist, stellt dieser eine Kombination von zwei Bändern dar, deren Multispektralbereich es erlaubt, Vegetation in Satellitenbildern zu detektieren. Da der WV2 Sensor optische Bilder zur Verfügung stellt, denen acht verschiedene Multispektralkanäle zugrunde liegen, können für WV2 Bilder zur Berechnung des NDVIs das 'red edge' Band (RE) und das rote Band (R) verwendet werden. Bei optischen Satellitenbildern, für die nur vier Multispektralkanäle zur Verfügung stehen (z.B. QB2 oder PHR1B Aufnahmen), werden zur Filterung der Vegetation anstatt des 'red edge' Bandes das Band im nahen Infrarotbereich für RE verwendet.

Zum anderen werden Hörschwellwerte herangezogen, um die Vegetation anhand des berechneten NDVIs zu klassifizieren. Begründet ist die Nutzung von Hörschwellwerten darin, dass der Datenverlust durch die Vorverarbeitung des DOMs so gering wie möglich gehalten werden soll. Daher sollen Bodenflächen mit sehr niedriger Vegetation (z.B. Gras) nicht eliminiert werden, sondern im DOM erhalten bleiben. Auf Basis der Klassifikation wird anschließend eine Maske erstellt, welche die im Satellitenbild befindliche Vegetation beinhaltet. Nach Nachbesserung der Vegetationsmaske anhand von morphologischen Operatoren wird diese dazu herangezogen, die Pixel im DOM, die der Vegetation zugeordnet werden können, durch den Wert des erstellten DGMs zu ersetzen. Um die Verrauschtheit zu minimieren, Ausreißer zu entfernen und die Ausfransungen an den Kanten abgebildeter Gebäude glatter zu gestalten, wird das um Vegetation reduzierte DOM im Anschluss mittels eines Medianfilters geglättet.

3. Schritt: nDOM Generierung

Die Generierung eines nDOMs erfolgt durch Subtraktion des DGM vom gefilterten DOM. Hierbei kommt es bei der Berechnung von optischen nDOMs zu Schwierigkeiten an Objektbegrenzungen, wie zum Beispiel Gebäudegrenzen, da Anteile von Gebäudefassaden verloren gehen. Daher wird im Zuge der Vorprozessierung nach Subtraktion des DGMs vom gefilterten DOM das erstellte nDOM unter Zuhilfenahme morphologischer Operatoren nachbearbeitet. Es wird an den Rändern des nDOMs an jedem Pixel eine Ergänzung um ein weiteres Pixel vorgenommen. Dadurch wird sichergestellt, dass auch der Fußpunkt des Gebäudes im erstellten nDOM enthalten ist. Würde diese Maßnahme nicht getroffen werden, würden Teile der Gebäudefassade nicht im nDOM vorhanden sein.

B Verfügbarkeit von Daten und Quellcode

Sowohl der in Python implementierte Quellcode als auch die Daten zur Durchführung der Simulationen und alle der dafür notwendigen Informationen (z.B. 'readme') liegen dem IMF-PBA am DLR in Oberpfaffenhofen vor und können dort eingesehen werden.